

SÉRIE A. N° 1013

N° D'ORDRE :

1849

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. P. LAFFITTE

Préparateur à la Sorbonne

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ONDE EXPLOSIVE ET L'ONDE DE CHOC.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **29 Mai 1925** devant la Commission d'examen.

MM. H. LE CHATELIER... *Président.*

CH. FABRY..... } *Examineurs.*
M. GUICHARD..... }

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1925

SÉRIE A. N° 1013

N° D'ORDRE :

1849

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. P. LAFFITTE

Préparateur à la Sorbonne

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ONDE EXPLOSIVE ET L'ONDE DE CHOC.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **29** Mai 1925 devant la Commission d'examen.

MM. H. LE CHATELIER.. *Président.*

CH. FABRY..... } *Examineurs.*
M. GUICHARD. }

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1925

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... MOLLIARD, *Prof*... Physiologie végétale.

Doyen honoraire... P. APPELL.

Profess. honoraires.. { P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.
A. HALLER.
A. JOANNIS.



	E. PICARD.....	Analyse supér. et algèbre supérieure.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
	JANET.....	Electrotechnique générale.
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie.
	PAINLEVÉ.....	Mécanique anal. et mécanique céleste.
	HAUG.....	Géologie.
	H. LE CHATELIER.	Chimie générale.
	G. BERTRAND.....	Chimie biologique.
	M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale et radioactivité.
	CAULLERY.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés)
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	G. URBAIN.....	Chimie minérale.
	EMILE BOREL.....	Calcul des probabilités et phys. mathém.
	MARCHIS.....	Aviation.
	JEAN PERRIN.....	Chimie physique.
	ABRAHAM.....	Physique.
	CARTAN.....	Géométrie supérieure.
<i>Professeurs</i>	LAPICQUE.....	Physiologie.
	GENTIL.....	Géographie physique.
	VESSIOT.....	Théorie des groupes et calc. des variat.
	COTTON.....	Physique générale.
	DRACH.....	Application de l'analyse à la géométrie.
	C. FABRY.....	Physique.
	CHARLES PÉREZ.....	Zoologie.
	LEDUC.....	Physique théorique et phys. céleste.
	LÉON BERTRAND...	Géologie appliquée et géolog. régionale.
	LESPIEAU.....	Théories chimiques.
	RABAUD.....	Biologie expérimentale.
	PORTIER.....	Physiologie comparée.
	E. BLAISE.....	Chimie organique.
	DANGEARD.....	Botanique.
	MAURAIN.....	Physique du Globe.
	MONTEL.....	Mathématiques générales.
	WINTREBERT.....	Anatomie et histologie comparées.
	DUBOSQ.....	Biologie maritime.
	M. TIFFENEAU.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	N.....	Mécanique rationnelle.
	HÉROUARD.....	Zoologie.
	RÉMY PERRIER.....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
	SAGNAC.....	Physique théorique et physique céleste.
	PÉCHARD.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	AUGER.....	Chimie analytique.
	M. GUICHARD.....	Chimie minérale.
	GUILLET.....	Physique.
	JULIA.....	Mathématiques générales.
	MAUGUIN.....	Minéralogie.
	BLARINGHEM.....	Botanique.
	MICHEL-LÉVY.....	Pétrographie.
<i>Secrétaire</i>	D. TOMBECK.	

A mon Maître

Monsieur H. LE CHATELIER

Membre de l'Institut

Hommage respectueux et reconnaissant.

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ONDE EXPLOSIVE ET L'ONDE DE CHOC

Par P. LAFFITTE

INTRODUCTION

I. — Historique ⁽¹⁾.

1. Les mélanges gazeux détonants. — Les premières expériences sur la propagation des combustions dans les *mélanges gazeux* datent d'un siècle environ. C'est Humphrey Davy qui, le premier, a été conduit à les entreprendre au cours de ses recherches « Sur l'air inflammable des mines de charbon » ⁽²⁾. Il détermina — d'une manière très approximative, il est vrai — le temps que met le mélange le plus combustible d'air et de grisou à parcourir un tube d'un pied de longueur (30,5 cm.) et d'un quart de pouce de diamètre (6,3 mm.); il trouva qu'il fallait plus d'une seconde pour que la flamme parvint d'une extrémité à l'autre du tube. Il

⁽¹⁾ Nous ne reproduirons pas la bibliographie complète de la question. Nous indiquerons seulement les ouvrages et mémoires les plus importants. Pour une bibliographie plus complète on pourra se reporter à l'ouvrage récent de BRUNSWIG : « *Explosivstoffe* », Leipzig, 1923.

⁽²⁾ *Phil. Trans.*, 1816, Collected Works, t. VI, p. 26 ; *Ann. Ch. et Phys.*, série 2, t. I, 1830, p. 136.

ne fit pas d'autres mesures sur ce sujet ; mais, c'est à la suite de ces recherches qu'il découvrit la propriété des tubes étroits et des toiles métalliques d'arrêter la propagation des flammes, et qu'il imagina les lampes de sûreté employées aujourd'hui encore dans les mines de charbon.

Plus tard Bunsen ⁽¹⁾, dans ses recherches sur les températures de combustion des mélanges gazeux, étudia la propagation de la flamme dans le mélange oxy-hydrique. Il opérait de la manière suivante : le mélange gazeux combustible arrivait par un tube à parois minces à l'extrémité duquel on l'allumait ; puis on diminuait la vitesse du courant gazeux jusqu'à ce que la flamme pénétrât à l'intérieur du récipient contenant le gaz combustible. On admettait qu'à ce moment la vitesse de propagation de la flamme était égale à la vitesse d'écoulement du mélange gazeux, vitesse que l'on pouvait connaître, par exemple, si le mélange était contenu dans un gazomètre, en mesurant la diminution du volume gazeux en un temps donné. Mais on n'a de cette manière qu'une vitesse moyenne, car on est obligé d'admettre que tous les filets gazeux s'écoulent à la même vitesse, alors que la vitesse d'écoulement des filets centraux est supérieure à celle des filets latéraux. Aussi n'avait-on que des résultats assez peu précis, comme le furent aussi ceux d'autres expérimentateurs, qui ont étudié les mêmes questions par des procédés analogues.

Parmi ceux-ci, Mallard ⁽²⁾ a étudié la vitesse de propagation de l'inflammation dans les mélanges d'air et de grisou en vue de l'appliquer à la théorie des lampes de sûreté. F. de Benevides ⁽³⁾ a étudié la propagation de la flamme dans les mélanges d'oxygène et de divers gaz. Gouy ⁽⁴⁾ a

⁽¹⁾ BUNSEN, *Pogg. Ann.*, t. CXXI, 1866, p. 161.

⁽²⁾ *Ann. Min.*, 7^e série, t. VII, 1875, p. 355.

⁽³⁾ F. DE FONSECA DE BENEVIDES, *Jornal de Sciencias Matematicas physicas et naturas*, t. XXVII, Lisbonne, 1880.

⁽⁴⁾ *Ann. Ch. Phys.*, 5^e série, t. XVIII, 1879, p. 55.

également essayé de faire ces mesures avec les mélanges de gaz d'éclairage et d'air.

Dans toutes ces expériences, la propagation de la combustion se faisait par transmission de la chaleur d'une tranche du mélange explosif à la tranche suivante; c'est le mode de *propagation par conductibilité*. Il correspond à la *déflagration* du mélange combustible. C'est la propagation normale de l'inflammation dans les mélanges gazeux. Son mécanisme est le suivant : une tranche du mélange combustible transmet en brûlant une certaine quantité de chaleur à la tranche suivante, dont la température s'élève par conséquent ; lorsque cette température a atteint une valeur déterminée, cette nouvelle tranche du mélange brûle à son tour, et ainsi de suite. On voit que la vitesse de propagation de la combustion dépendra de la vitesse à laquelle se transmettra la chaleur d'une tranche d'explosif à la suivante, c'est-à-dire, entre autres facteurs, de la conductibilité du mélange, de sa chaleur spécifique, ainsi que des surfaces refroidissantes du récipient dans lequel a lieu la combustion. Par conséquent, la vitesse de combustion d'un mélange gazeux aura une valeur déterminée dans chaque cas particulier. Mais nous allons voir que ce mode de propagation de la combustion n'est pas le seul possible.

En 1881-1882, au cours de leurs expériences sur la vitesse de propagation des phénomènes explosifs dans les gaz, Berthelot et Vieille ⁽¹⁾ mesurèrent des vitesses de beaucoup supérieures à celles que l'on avait observées jusque-là. Ils furent ainsi conduits à envisager un nouveau mode de propagation des phénomènes explosifs : la propagation par « **onde explosive** », dont le mécanisme est le suivant : une tranche du mélange gazeux étant amenée à une pression élevée, il en résulte que sa température croît jusqu'au moment où le mélange ayant atteint sa température d'inflammation, la combustion a lieu. Cette tranche comprime à

(1) *C. R.*, t. XCIII, 1881, p. 18.

son tour la tranche suivante qui brûle également, et ainsi de suite, de sorte que dans l'onde explosive, la combustion se transmet au fur et à mesure de la propagation d'une pression élevée. Il y a ainsi juxtaposition du phénomène mécanique et du phénomène chimique, c'est à-dire que l'onde explosive est caractérisée par la réunion de l'ébranlement mécanique et de la flamme.

La différence capitale entre l'onde sonore et l'onde explosive est que « l'onde sonore est transmise de proche en proche avec un excès de pression très petit et une vitesse déterminée par la seule constitution physique du milieu vibrant, vitesse qui est la même pour toute espèce de vibrations. Au contraire, c'est le changement de constitution chimique qui se propage dans l'onde explosive et qui communique au système en mouvement un excès de pression considérable » ⁽¹⁾. Aussi la vitesse de l'onde explosive est-elle tout à fait différente de celle des ondes sonores transmises dans le même milieu. Ainsi alors que, dans le mélange détonant d'hydrogène et d'oxygène l'onde sonore se propage à la vitesse de 514 m. par seconde, l'onde explosive atteint la vitesse de 2810 m. par seconde. Dans le mélange d'oxyde de carbone et d'oxygène, la vitesse de l'onde sonore est de 328 m. par seconde, et celle de l'onde explosive de 1090 m. par seconde. On voit, en outre, d'après ces chiffres, que la vitesse de l'onde explosive est de beaucoup supérieure à celle du son. Mais, alors que dans le phénomène sonore c'est un train d'ondes qui se propage, le phénomène explosif, au contraire, ne donne lieu qu'à une seule onde. De même qu'à la propagation de la combustion par conductibilité correspond la déflagration, de même à l'onde explosive correspond la détonation de la matière explosive.

(1) BERTHELOT et VIEILLE, *Ann. Ch. et Phys.*, 5^e série, t. XVIII, 1883, p. 289.

Une fois, l'existence de cette onde explosive mise en évidence, Berthelot et Vieille reconnurent rapidement ses principales propriétés ⁽¹⁾ :

1° L'onde explosive se propage à vitesse constante ;

2° Cette vitesse ne dépend que de la nature du mélange explosif et non de la matière du tube qui le contient (plomb, laiton, caoutchouc, verre, etc.) ;

3° Le diamètre du tube dans lequel se propage l'onde explosive, n'a d'influence appréciable que dans le cas des tubes de petit diamètre (inférieur à quelques millimètres) ;

4° La vitesse de l'onde explosive est indépendante de la pression (tout au moins pour des pressions variant dans le rapport de 1 à 3, au voisinage de la pression atmosphérique).

Dans leurs expériences Berthelot et Vieille effectuaient la mesure de la vitesse de l'onde à l'aide d'une méthode d'enregistrement chrono-électrique ⁽²⁾. A l'intérieur du tube dans lequel se propageait le phénomène explosif se trouvaient à une distance déterminée (40 m., en général) deux feuilles très minces d'étain parcourues par un courant électrique qui était interrompu au moment du passage du phénomène explosif ; cette interruption était rendue instantanée à l'aide d'un très petit grain de fulminate de mercure ou de picrate de potasse. Le passage de l'onde explosive était enregistré à l'aide d'un chronographe qui permettait d'apprécier l'intervalle de temps compris entre les deux interruptions du courant électrique, et par conséquent de connaître la vitesse de propagation du phénomène explosif entre les deux points où le circuit était interrompu par l'explosion.

A l'époque où Berthelot et Vieille faisaient leurs expériences sur les mélanges gazeux explosifs, Mallard et

⁽¹⁾ Sur l'onde explosive, *C. R.*, t. XCIV, 1881, p. 149.

⁽²⁾ Sur la vitesse de propagation des phénomènes explosifs dans les gaz, *C. R.*, t. XCIV, 1882, pp. 101 et 822.

Le Chatelier avaient également entrepris des recherches sur la combustion des mélanges gazeux. Après la publication de la découverte de l'onde explosive par Berthelot et Vieille ils eurent l'idée de l'*enregistrement photographique* du phénomène de la propagation ⁽¹⁾. Le principe de leur méthode est le suivant : un appareil photographique est disposé en face du tube de verre horizontal dans lequel a lieu l'explosion. La plaque est fixée sur un cadre vertical à coulisses le long duquel elle tombe en chute libre. Elle déclanche l'allumage électrique du mélange gazeux au moment de son passage devant l'objectif. La vitesse est donnée par la hauteur de chute de la plaque. L'image de la flamme qui parcourt le tube s'enregistre ainsi sur la plaque sous forme d'une ligne plus ou moins courbe (fig. 1). L'inclinaison de la tangente à cette courbe en un point donné permet de calculer la vitesse de propagation du phénomène explosif en ce point. Si cette vitesse de propagation est uniforme, comme c'est le cas pour l'onde explosive, l'image est limitée par une ligne droite (fig. 2 et 3).

Berthelot et Vieille avaient bien pu par la méthode d'enregistrement chrono-électrique déterminer avec précision la vitesse de l'onde explosive ; mais la méthode d'enregistrement photographique a encore permis à Mallard et Le Chatelier d'étudier la formation de l'onde explosive, les particularités de sa propagation ⁽²⁾ et, en particulier, de mettre en évidence des ondes condensées (ondes de réflexion, ondes rétrogrades) et d'étudier leurs propriétés ⁽³⁾. Elle leur a aussi permis l'étude de la déflagration : étude des vitesses de propagation de la combustion dans les mélanges gazeux explosifs ⁽⁴⁾ ; étude de la nature des mouvements qui accom-

(1) *Ann. Min.*, 8^e série, t. IV, 1883, p. 274.

(2) *C. R.*, t. CXXX, 1900, p. 1755.

(3) *C. R.*, t. CXXXI, 1900, p. 30.

(4) *C. R.*, t. XCIII, 1881, p. 145.

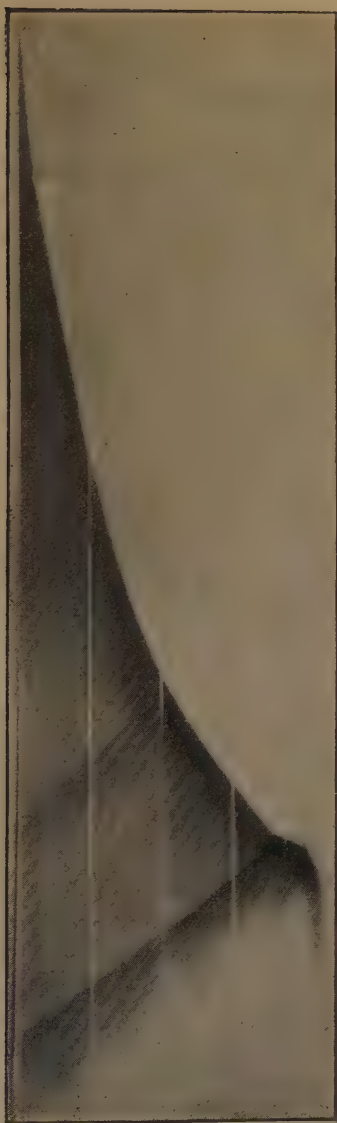


Fig. 1. — Combustion du mélange $\text{CS}^2 + 2\text{O}^2$ dans un tube de 2 m. de longueur et de 33 mm. de diamètre. Des papiers opaques ont été collés sur le tube tous les 50 cm. La vitesse de la combustion a crû jusqu'à 20 cm. de l'extrémité du tube où elle a atteint une valeur constante.

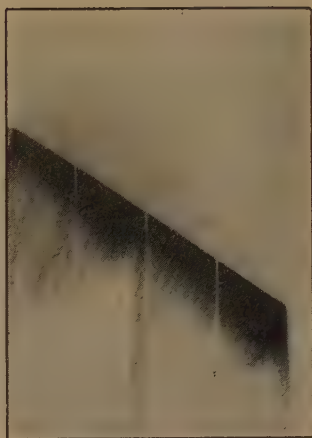


Fig. 2. — Propagation de l'onde explosive dans un tube de 2 m. de longueur et de 24 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).



Fig. 3. — Propagation de l'onde explosive dans un tube de 1 m. 50 de longueur et de 10 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).

pagnent la propagation de la flamme dans les mélanges gazeux combustibles ⁽¹⁾, etc.

Les expériences de Berthelot et Vieille et celles de Mallard et Le Chatelier ont plus tard été reprises en Angleterre par H.-B. Dixon ; ses expériences ont fait le sujet d'une « bakerian lecture » et d'un mémoire publiés, le premier en 1893 et le second en 1903. Dans ses premières recherches ⁽²⁾ il employait une méthode d'enregistrement électro-chronographique analogue à celle de Berthelot ; l'explosion avait lieu dans un tube de plomb de 100 m. de longueur. Un très grand nombre de mesures ont été ainsi faites pour vérifier la constance de la vitesse de l'onde explosive pour divers mélanges gazeux ($H^2 + O$, $H^2 + Az^2O$, $CH^4 + 2.O^2$, etc.). L'influence de la température a aussi été étudiée, mais seulement dans l'intervalle compris entre 10° et 100° C. pour quelques mélanges : la vitesse de l'onde explosive diminue lorsque la température croît. Ainsi pour le mélange $H^2 + O$, l'onde qui se propage à raison de 2820 m. par seconde à 10° ne se propage plus qu'à la vitesse de 2790 m. à 100°. D'autres questions sont encore étudiées dans ce premier mémoire de Dixon : l'influence de la présence de la vapeur d'eau sur la vitesse de l'onde ; l'influence de la présence de gaz inertes, etc.

Dans son second mémoire ⁽³⁾, Dixon expose les résultats des recherches qu'il a faites par la méthode d'enregistrement photographique de Mallard et Le Chatelier. Mais au lieu d'employer une plaque sensible tombant en chute libre, il utilisait un film sensible enroulé sur un cylindre d'un mètre de circonférence, tournant à des vitesses de 25 à 50 tours par seconde. Un très grand nombre de questions ont été ainsi étudiées d'une manière très complète : la for-

(1) *C. R.*, t. XCV, 1882, p. 599.

(2) *Phil. Trans.*, série A, t. CLXXXIV, part. 1, 1893, p. 97.

(3) *Phil. Trans.*, série A t. CC, 1903, p. 315.

mation et la propagation de l'onde explosive ⁽¹⁾, sa réflexion; la vitesse de l'onde sonore dans les mélanges détonants, l'interférence de deux ondes explosives, l'étude de l'onde rétrograde, etc. Dans de plus récents mémoires, Dixon a encore étudié les mouvements de la flamme dans l'explosion des gaz, la formation et la propagation des explosions ⁽²⁾, l'influence du champ magnétique sur la vitesse de l'onde explosive ⁽³⁾, etc.

2. Les explosifs solides. — Les mesures précises sur la propagation des explosions dans les *explosifs solides* sont encore plus récentes que celles faites sur les explosifs gazeux. Mais avant la découverte de l'onde explosive dans les gaz, Roux et Sarrau ⁽⁴⁾ avaient, en 1873, distingué pour la dynamite deux modes différents d'explosions, l'un qu'ils appelaient l'*explosion du premier ordre ou détonation*, l'autre l'*explosion du second ordre* (qui correspond à la déflagration), analogue à l'explosion de la poudre noire. Les explosions du premier ordre ne pouvaient être provoquées

⁽¹⁾ Dans son premier mémoire Dixon appelle l'onde explosive : *explosion-wave* ; dans le second il l'appelle *detonation-wave*, mais un grand nombre d'auteurs anglais ont cependant continué à se servir de la première expression. Quant à nous, nous emploierons uniquement l'expression *onde explosive* (ainsi dénommée par Berthelot) à laquelle correspond la *détonation* de la matière explosive, en réservant le mot *explosion* à l'ensemble de la déflagration et de la détonation, comme nous l'avons défini plus haut. Dans leur mémoire, paru en 1883 aux *Annales des Mines*, MALLARD et LE CHATELIER faisaient correspondre l'explosion à l'onde explosive, comme il serait assez logique. Mais depuis l'usage a prévalu de réserver le mot *explosion* à l'ensemble des deux périodes de combustion et d'onde explosive. D'ailleurs il est souvent des cas où l'on ne peut savoir s'il y a ou non *onde explosive*, et il ne paraît cependant pas illogique de dire alors qu'il y a eu explosion.

⁽²⁾ *Journ. of. the Chem. Soc.*, t. XCVII, part. 1, 1910, p. 661 et t. CXXIII, 1923, p. 1025.

⁽³⁾ *Proceed. of. the R. Soc.*, série A, t. XC, 1914, p. 506.

⁽⁴⁾ *C. R.*, t. LXXVI, 1873, p. 1089.

que par une percussion suffisante (ou par amorçage à l'aide du fulminate de mercure) ; quant aux explosions du second ordre elles se produisaient par l'inflammation de la dynamite.

Les premières mesures de la vitesse de propagation de la détonation dans les explosifs solides et liquides ont été entreprises par la Commission des Substances explosives ; elles ont fait le sujet d'un mémoire de Berthelot, paru en 1885.⁽¹⁾ Les expériences ont porté sur le coton-poudre, la dynamite, la nitro-glycérine liquide, etc. L'explosif était introduit dans des tubes en plomb de 100 ou 200 m. de longueur et de 1 à 2 mm. de diamètre intérieur. Les mesures étaient effectuées à l'aide d'une méthode tout à fait semblable à celle que Berthelot et Vieille avaient employée dans leurs expériences sur les explosifs gazeux. La vitesse de détonation du coton-poudre a été trouvée égale en moyenne à 5200 m. par seconde environ ; celle de la nitro-glycérine à 1300 m. et celle de la dynamite à 2700 m. environ, etc. Mais à cause du faible diamètre des tubes utilisés il était difficile d'avoir une densité de chargement uniforme et, en outre, le diamètre de ces tubes n'était pas suffisamment constant. Aussi ces chiffres ne sont-ils que des moyennes d'expériences dont les résultats n'étaient pas toujours très concordants. Cette méthode a l'inconvénient d'exiger des tubes de très grande longueur, ce qui pour des diamètres d'un ou quelques centimètres, conduirait à employer de trop grandes quantités d'explosif.

En 1903 au V^e Congrès International de Chimie appliquée, Mettegang décrivit un appareil destiné à mesurer la vitesse de détonation des explosifs ⁽²⁾. Le principe de l'appareil est le suivant. Aux deux extrémités de la cartouche d'explosif passent deux fils métalliques qui constituent deux dérivations

⁽¹⁾ *Ann. Ch. et Phys.*, 6^e série, t. VI, 1885, p. 656.

⁽²⁾ *V^e Congrès de Chimie Appliquée*, Berlin, 1903, t. II, p. 322.

d'un même circuit primaire contenant aussi une bobine d'induction. L'un des pôles du secondaire est au contact d'un tambour enduit de noir de fumée ; l'autre communique avec une pointe de platine dont l'extrémité est à un quart de millimètre du tambour. Toute variation dans l'intensité du courant primaire produit un courant induit dans le secondaire, et une étincelle jaillit entre la pointe de platine et le tambour enfumé, ce qui produit sur celui-ci une petite marque blanche. On a ainsi deux signaux sur le tambour. Connaissant la vitesse de rotation du tambour et la distance des deux signaux, on en déduit facilement la vitesse de détonation. Cette méthode a été appliquée par l'auteur à la mesure de la vitesse de détonation de la dynamite à la gélatine et de la nitro-glycérine. Elle a depuis été modifiée et perfectionnée par Kast ⁽¹⁾. Elle a sur la méthode de Berthelot l'avantage d'exiger de moins grandes longueurs d'explosif. Mais dans l'une comme dans l'autre méthode on doit cependant employer des masses assez importantes d'explosif.

Ce n'est que lorsque l'on eût à sa disposition une méthode plus précise, due à l'ingénieur des poudres Dautriche, que l'on put étudier d'une manière complète les facteurs qui influent sur la vitesse de détonation (diamètre du tube, densité de chargement, etc.). Ses expériences doivent être considérées comme capitales à cet égard.

La méthode qu'il a imaginée, en 1906, est basée sur l'emploi de cordons détonants réguliers, ayant une vitesse connue de détonation ⁽²⁾. La vitesse des cordons qu'il utilisait était déterminée très exactement à l'aide d'un chronographe Schultz. Si un tel cordon détone à raison de 6.000 m. par seconde, 1 cm. du cordon correspondra à 1/600.000 de seconde. Soit un circuit formé de deux bouts d'un tel cor-

(1) *Zeitschr. ges. Schies. u. Sprengstoffwes.*, 8, 1913, p. 135.

(2) DAUTRICHE, Sur la vitesse de détonation des explosifs, *C. R.*, t. CXLIII, 1906, p. 641.

deau, accolés sur une certaine longueur et amorcés aux extrémités opposées. Si l'on obtient au point de rencontre des deux détonations un signal caractéristique, on aura déterminé deux longueurs qui auront détoné dans le même temps ; et, si l'on a intercalé dans l'une des deux branches un tube contenant l'explosif à étudier, on pourra aisément déterminer la longueur du cordeau-type qui détone dans le même temps que le cordeau considéré. L'artifice imaginé par Dautriche pour déterminer le point de rencontre des détonations dans les deux cordeaux, est basé sur l'observation suivante. « Lorsqu'on accole deux cordeaux le long d'une génératrice et qu'on les fait détoner au contact d'une feuille de plomb de 25 mm. d'épaisseur, en les amorçant aux deux extrémités opposées, on constate au point de rencontre des détonations un signal caractéristique : une empreinte sensiblement rectiligne raccorde à 45° les traces des cordeaux sur la plaque de plomb. »

Cette méthode a donné d'excellents résultats pour la mesure de la vitesse de détonation d'explosifs quelconques. Elle a permis à Dautriche d'étudier les variables influant sur la vitesse de détonation : diamètre du tube et densité de chargement ⁽¹⁾. C'est ainsi que pour la cheddite 60 *bis* (chlorate de potasse, 80 parties ; huile de ricin, 5 parties ; mononitronaphtaline, 13 parties ; dinitrotoluène, 2 parties) la courbe des vitesses en fonction des densités de chargement présente un maximum pour la densité $\Delta = 1,10$, comme le tableau suivant permet de s'en rendre compte.

Δ	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,20	1,30	1,37
V	2100 ^m	2248 ^m	2430 ^m	2504 ^m	2550 ^m	2510 ^m	2360 ^m	2166 ^m

(¹) DAUTRICHE, Sur la vitesse de détonation des explosifs, *C. R.*, t. CXLIV, 1907, p. 1030.

Récemment Wagstaff ⁽¹⁾ a décrit une méthode électrique pour déterminer les vitesses de détonation des explosifs. Elle est basée sur la mesure de la décharge d'un condensateur pendant le court intervalle de temps de l'ordre de 10^{-4} sec que dure la détonation d'une colonne d'explosif de quelques décimètres de longueur. L'auteur l'a jusqu'ici seulement appliquée à l'étude de la vitesse de détonation du trinitrotoluène. Une méthode basée sur un principe semblable avait déjà été proposée, en 1900, par Radakovic ⁽²⁾.

Ces méthodes ne permettent pas d'enregistrer d'une façon continue la loi de propagation de la détonation dans la colonne d'explosif. On peut seulement connaître la vitesse moyenne entre deux points donnés : ces points sont quelquefois éloignés de plusieurs dizaines de mètres, comme dans la méthode de Berthelot, ou de quelques décimètres, comme dans la méthode de Dautriche. Dans la méthode d'enregistrement photographique au contraire, la loi de propagation du phénomène est enregistrée d'une façon continue. Or cette méthode qui a fourni de nombreux et très intéressants résultats dans l'étude des explosifs gazeux, n'a presque jamais été employée pour les explosifs solides.

3. Théorie de l'onde explosive. — Au point de vue de la *théorie de l'onde explosive*, Berthelot et Vieille rapprochaient la vitesse de l'onde explosive de la vitesse cinétique moyenne des molécules dans les gaz, supposés portés à haute température par la combustion qui se produit au passage de l'onde explosive ⁽³⁾. Cette vitesse peut se calculer d'après la formule de Clausius

$$U = 29,354 \sqrt{\frac{\bar{T}}{\rho}} \text{ m./sec.}$$

(1) WAGSTAFF (J. E. P.), *Proceed. Roy. Soc.*, série A, vol. 105, p. 282.

(2) RADAKOVIC, *Wien. Ber.*, 2a, 109, 1900, pp. 276 et 941.

(3) BERTHELOT, *Sur la force des Matières Explosives*, 3^e édit., Paris, 1883, t. I, p. 191.

T, étant la température absolue et ρ la densité du gaz par rapport à l'air. Mais les vitesses ainsi calculées, par Berthelot, à l'aide de cette formule diffèrent, quelquefois dans d'assez grandes proportions, des vitesses déterminées expérimentalement.

Plus tard Dixon, rapprocha la vitesse de l'onde explosive dans un mélange gazeux, de la vitesse du son dans ces mêmes gaz à la température de la combustion. Pour quelques mélanges gazeux détonants, les chiffres qu'il obtint ainsi sont assez voisins de ceux qu'il avait obtenus expérimentalement. Mais d'une manière générale, ils sont, cependant, assez éloignés des résultats expérimentaux.

La véritable théorie de l'onde explosive n'a été faite que plus tard par Chapman ⁽¹⁾ et par Jouguet ⁽²⁾, indépendamment l'un de l'autre. Leur théorie a pour point de départ les travaux de Riemann, et ceux d'Hugoniot ⁽³⁾ sur la propagation des ondes de choc dans les fluides inertes, c'est-à-dire abstraction faite de toute réaction chimique. D'après la théorie d'Hugoniot, dans un gaz parfait au repos, un mouvement quelconque se propage avec une vitesse égale à la vitesse normale du son, tant qu'il ne s'introduit aucune discontinuité (comme une augmentation brusque de la pression, par exemple). Cette vitesse est, d'ailleurs, la même que le mouvement s'effectue par tranches parallèles ou par couches sphériques. Mais, si une discontinuité se produit dans un gaz parfait (comme c'est le cas pour une onde de choc se propageant dans un gaz inerte, et où une tranche passe très brusquement de la pression atmosphérique à une pression très éle-

(1) On the rate of Explosions in gases, *Phil. Mag.*, janv. 1899, p. 90.

(2) Les travaux de M. JOUGUET ont été publiés dans un certain nombre de notes parues aux *Comptes Rendus*, mais l'ensemble de la théorie est exposé dans son ouvrage sur la *Mécanique des Explosifs*, Paris, 1917.

(3) *Journ. de Math. pures et appl.*, 4^e série, t. III, 1887, p. 477 et *Journ. de l'Ec. Polytechnique*, 57^e et 58^e cahiers, 1887 et 1889.

vé), chacune des tranches qui en subit l'effet, éprouve une variation brusque de pression et par suite de densité. Si la discontinuité se produit de manière à comprimer le gaz, la vitesse de propagation est supérieure à la vitesse normale de propagation du son, et, elle n'a d'ailleurs pas de limite.

Chapman et Jouguet se sont placés l'un et l'autre, dans le cas où la transmission de la pression entraîne un changement dans la constitution chimique du milieu qui propage le phénomène, comme c'est le cas pour l'onde explosive. M. Jouguet a, en outre, fait les hypothèses suivantes. Le changement de constitution chimique se fait sur le front de l'onde, et immédiatement derrière l'onde, l'état du mélange est un état d'équilibre. Il a, de plus, supposé qu'on avait affaire, aussi bien pour les produits de la combustion que pour le mélange initial, à des mélanges gazeux parfaits, c'est-à-dire obéissant aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac ; mais il a supposé que la chaleur spécifique était fonction de la température. En outre, il a tenu compte des deux propriétés expérimentales suivantes :

1° La propagation de l'onde est indépendante des conditions aux limites en arrière. En effet, la vitesse de propagation de l'onde est la même, que l'on produise l'inflammation du mélange à l'extrémité ouverte ou à l'extrémité fermée d'un tube ; elle est également indépendante du mode d'inflammation (flamme, étincelle, détonateur, etc.).

2° La vitesse de propagation est uniforme. Cela résulte, en effet, aussi bien des expériences de Berthelot et Vieille que de celles de Mallard et Le Chatelier ou de Dixon.

A partir de ces hypothèses, M. Jouguet a calculé les vitesses de propagation de l'onde explosive pour un certain nombre de mélanges gazeux explosifs (¹).

(¹) Signalons à ce propos que la théorie de M. JOUGUET permet de différencier théoriquement les déflagrations des détonations, *C. R.*, t. CLVII, 1913, p. 545. Voir aussi CRUSSARD, *La Technique Moderne*, t. IX, 1914, p. 84.

On trouvera, dans le tableau suivant, à côté des résultats expérimentaux, les résultats des calculs de Berthelot, Dixon et Jouguet pour un certain nombre de mélanges.

Mélange	Vitesse observée par		Vitesse calculée par		
	Berthelot	Dixon	Berthelot	Dixon	Jouguet
$H^2 + O$. . .	2810	2821	2900	3416	2629
$CH^4 + 2O^2$. .	2287	2322	2427	»	2220
$C^2N^2 + 2O^2$. .	2195	2321	2490	2310	2220
$N^2O + H^2$. . .	2284	2305	2250	2706	2350
$CO + H^2 + O^2$.	2008	2143	2236	»	1984
$H + Cl$	»	1729	1571	1830	1851

On peut remarquer que les chiffres expérimentaux de Berthelot sont toujours inférieurs à ceux de Dixon. Cela tient à ce que Berthelot n'employait pas toujours des gaz purs. En particulier, ses gaz contenaient de la vapeur d'eau, tandis que Dixon prenait bien soin de dessécher les gaz qu'il employait.

II. — Plan du mémoire.

Nous avons rapporté dans la *Première Partie* de ce travail les résultats des recherches que nous avons entreprises sur les *mélanges gazeux détonants* ($CS^2 + 3O^2$, $CH^4 + 2O^2$, $H^2 + O$).

On trouvera dans un premier chapitre l'*exposé de la méthode* d'enregistrement chrono-photographique utilisée pour toutes les expériences rapportées dans ce mémoire.

Dans le second chapitre sont rapportées les expériences entreprises dans le but d'étudier la *formation de l'onde explosive* dans des tubes de verre, et en particulier, l'étude de l'influence du diamètre du tube et de la nature des parois

sur l'établissement de l'onde explosive, lorsque le mélange gazeux détonant est enflammé à l'aide d'une étincelle électrique.

Le chapitre III est consacré à l'étude de la *propagation de l'onde explosive* dans des tubes cylindriques. L'influence de la variation brusque du diamètre a en particulier été étudiée, ainsi que l'influence de la nature des parois et celle de la température initiale.

Dans le chapitre suivant sont rapportées les recherches entreprises en vue de mettre en évidence l'*onde explosive sphérique* dans des ballons en verre, au centre desquels on produisait la détonation du mélange gazeux.

Dans la *Seconde Partie* sont rapportées les recherches que nous avons entreprises sur les *explosifs solides* (dynamite, acide picrique, etc.). Le premier chapitre est consacré aux expériences faites sur la *propagation de la détonation* dans des tubes cylindriques en verre de faible diamètre.

Lorsqu'on fait détoner un de ces explosifs solides contenu dans un tube de verre dont il n'occupe qu'une partie seulement de la longueur, on constate sur les photographies que le tube est lumineux sur une longueur bien supérieure à celle qui correspond à la partie remplie d'explosif. Nous avons attribué cette luminosité à l'onde de choc qui prend naissance dans le tube au delà de la dernière tranche d'explosif, et qui est portée à une pression et à une température considérables. Un chapitre est consacré à l'étude des propriétés de cette *onde de choc*, telles que sa vitesse de propagation dans divers gaz (hydrogène, oxygène, azote, etc.) et dans des mélanges gazeux détonants ($H^2 + O$, $CS^2 + 3O^2$), sa propagation à travers des matières solides (verre, métaux). Une partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de la transmission de la détonation à distance.

Enfin des expériences de *spectroscopie* ont été entreprises pour étudier la lumière émise au cours des explosions (explo-

sifs gazeux et solides) : ces expériences sont rapportées dans le dernier chapitre de ce mémoire.

Nous avons résumé dans une *conclusion* les principaux résultats auxquels nous sommes parvenus au cours de nos recherches.

Ces travaux ont été entrepris et exécutés au Laboratoire de Chimie Générale de la Sorbonne. Nous sommes heureux de témoigner ici notre très vive et très sincère reconnaissance à notre Maître, M. H. Le Chatelier, membre de l'Institut, professeur à la Sorbonne, qui nous a suivi pendant tout le cours de ces recherches. Nous adressons également tous nos remerciements M. M. Guichard, professeur à la Sorbonne, qui nous a souvent aidé de ses précieux conseils, et à M. E. Jouguet, professeur à l'Ecole des Mines, dont les renseignements nous ont été si utiles.

PREMIÈRE PARTIE

L'ONDE EXPLOSIVE DANS LES MÉLANGES GAZEUX DÉTONANTS

CHAPITRE PREMIER

Méthode et appareils utilisés.

I. — Appareils de photographie et d'enregistrement.

Nous avons vu que la méthode que nous avons utilisée pour nos recherches est basée sur le principe de l'enregistrement photographique de Mallard et Le Chatelier. Dans le dispositif utilisé par ces auteurs, la plaque qui tombait en chute libre avait une vitesse de l'ordre de 8 à 9 m. par seconde ⁽¹⁾, vitesse que l'on peut difficilement dépasser par ce procédé. Aussi, avons-nous employé un dispositif analogue à celui que Dixon a utilisé et dont nous avons déjà indiqué le principe. D'ailleurs bien avant Dixon, Mallard et Le Chatelier avaient utilisé un tambour tournant sur lequel était fixé un papier sensible ⁽²⁾ ; il est vrai que la vitesse de rotation de ce tambour était très faible : elle correspondait à des vitesses linéaires de déplacement de papier photographique de 1 m. par seconde.

⁽¹⁾ BERTHELOT et LE CHATELIER, *Ann. Ch. et Ph.*, 7^e série, t. XX, 1900, p. 15.

⁽²⁾ MALLARD et LE CHATELIER, *Ann. Min.*, 8^e série, t. VI, 1883, p. 274.

Nous nous sommes servis d'un cylindre en carton de 24 cm. de diamètre et de 6 cm. de hauteur. L'axe de ce cylindre était horizontal, et sur sa surface était appliqué un papier sensible au gélatino-bromure d'argent, de 6 cm. de largeur et de 75 cm. de longueur. L'axe du cylindre portait une poulie en bois, à gorge, à laquelle était transmis par l'intermédiaire d'une courroie en cuir, le mouvement de rotation d'un moteur électrique (fig. 4).

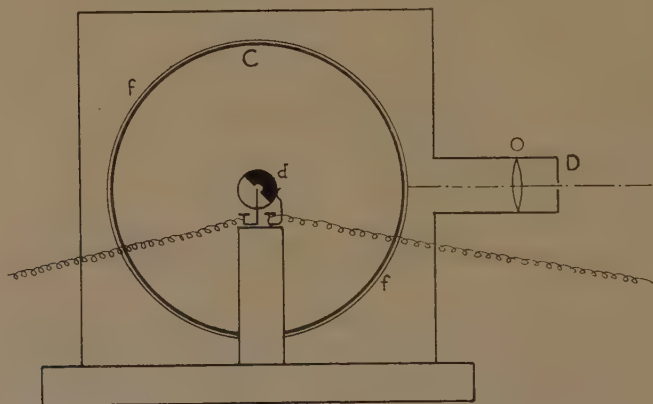


Fig. 4.

On peut ainsi obtenir facilement des vitesses de rotation du cylindre photographique de 55 à 60 tours par seconde, ce qui correspond à des vitesses linéaires de déplacement du film de 45 m./sec. environ. On ne peut faire tourner le cylindre à des vitesses plus grandes, car au delà de 50 m. par seconde la résistance du papier photographique devient insuffisante, et sous l'action de la force centrifuge il est déchiré en très nombreux fragments qui sont projetés à l'intérieur de la boîte dans laquelle est enfermé le cylindre photographique, boîte servant de chambre noire.

La vitesse à laquelle tourne le cylindre photographique ne peut pratiquement pas être déduite de la vitesse de rotation

du moteur qui l'entraîne, à cause du glissement de la courroie de cuir. On doit donc mesurer directement la vitesse du cylindre photographique. A cet effet, sur l'axe du cylindre se trouve un petit disque, dont une moitié est en laiton et l'autre en fibre non conductrice. Une lame métallique est en contact avec ce disque. Cette lame et le disque se trouvent dans le circuit d'un accumulateur A_1 (fig. 5). De cette manière à chaque tour du cylindre le courant est interrompu pendant la moitié de la révolution du cylindre, et pendant l'autre moitié le courant traverse le circuit. En outre, dans ce circuit se trouve un signal de Marcel Deprez; l'armature de l'électro-aimant e_1 de ce signal porte une aiguille qui est en contact avec la surface d'un tambour T, sur le quel est enroulé une feuille de papier glacé enduite de noir de fumée. Un mouvement d'horlogerie M_1 communique à ce tambour un mouvement de rotation uniforme de 1 tour par seconde environ. De plus le signal de Deprez est porté par un chariot c qui se déplace d'un mouvement de translation uniforme sur une vis sans fin VV' . Un mouvement d'horlogerie M_2 fait tourner cette vis sans fin autour de son axe VV' par l'intermédiaire d'une courroie. L'aiguille du signal de Deprez se déplaçant parallèlement à l'axe du tambour T, elle décrit une hélice de pas très faible sur le papier enfumé appliqué sur la surface de ce tambour cylindrique, puisque celui-ci tourne autour de son axe d'un mouvement de rotation uniforme. Cette hélice reproduit en outre toutes les interruptions du courant du circuit électrique.

Le même chariot porte un autre signal de Deprez placé en série dans le circuit d'un accumulateur A_2 et d'un diapason Δ de 100 vibrations simples par seconde, entretenu électriquement. Ce signal de Deprez inscrit sur le papier enfumé du tambour les oscillations du diapason. On a, de la sorte, sur le papier enfumé deux courbes parallèles donnant, la première les interruptions du courant dans le circuit photographique, c'est-à-dire donnant le nombre de tours de ce

cylindre, et la seconde les vibrations du diapason donnant le

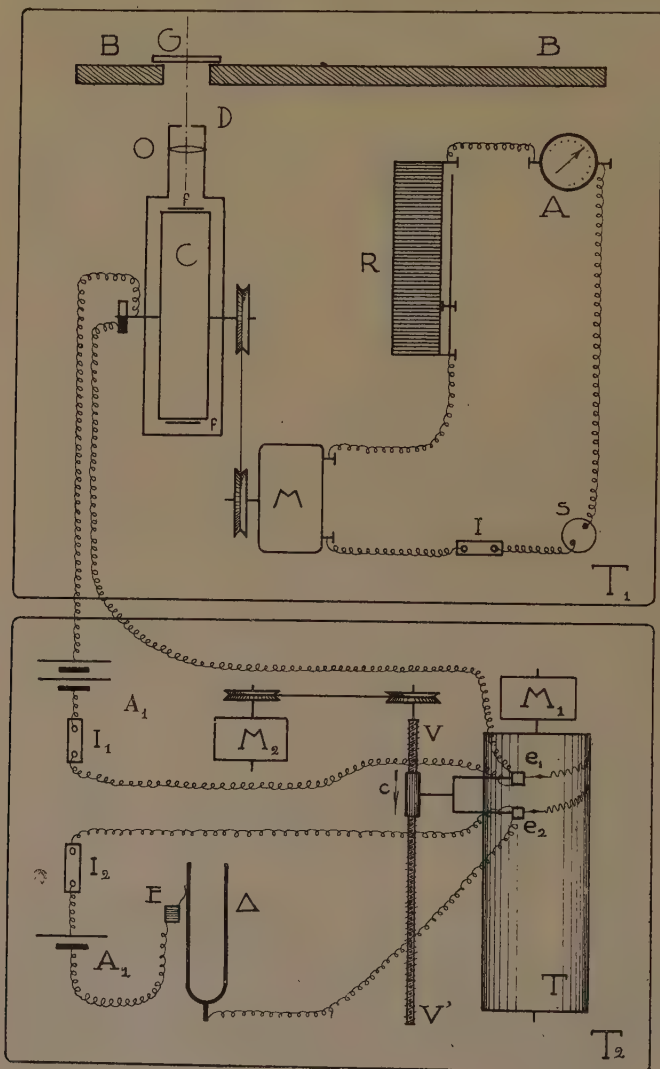


Fig. 5.

1/100 de seconde. On peut donc de la sorte connaître facile-

ment le nombre de tours effectués par le cylindre pendant que le diapason a vibré 200, 400, 600 ... fois, c'est-à-dire pendant 1, 2, 3 ... secondes. On en déduit aisément la vitesse de translation du film enroulé sur le cylindre photographique.

La figure 6 est la reproduction d'une partie d'un tel papier enfumé. La courbe supérieure correspond aux vibrations du diapason, et la courbe suivante correspond aux interruptions du courant du circuit du cylindre photographique et ainsi de suite, les courbes correspondant aux vibrations

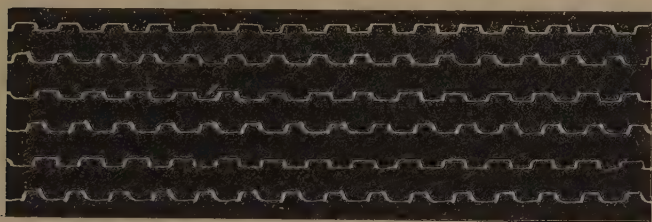


Fig. 6.

du diapason alternant avec les courbes donnant le nombre de tours du cylindre. Dans cette expérience le cylindre faisait par seconde un nombre de tours voisin de la période de vibration du diapason.

On voit sur la figure 5 de quelle manière étaient disposés tous les appareils. Le cylindre photographique C est placé sur une première table T_1 , ainsi que le moteur M qui l'entraîne et les appareils électriques correspondants (rhéostat, R ; ampèremètre, A ; interrupteur, I ; bornes du secteur, S). Ces appareils sont protégés des effets de l'explosion (projections d'éclats de cuivre du détonateur, etc.) par un bouclier B, en bois. L'objectif est protégé par une glace sans tain G. Le même bouclier protège également les appareils d'enregistrement qui sont situés sur une seconde table T_2 .

Le tube contenant l'explosif est situé à quelques mètres en

avant du cylindre photographique. Il est placé sur un fer à T de 1 m. 10 de longueur.

L'inflammation des mélanges gazeux détonants est provoquée à l'aide d'une étincelle électrique jaillissant entre les deux extrémités de deux fils de cuivre traversant le bouchon de liège fermant les tubes dans lesquels étaient contenus les gaz. Ces deux fils de cuivre sont reliés aux deux bornes du secondaire d'une bobine de Ruhmkorff. Le primaire de cette bobine est parcouru par un courant fourni par deux accumulateurs. Dans un certain nombre d'expériences relatives aux mélanges gazeux et dans toutes les expériences sur les explosifs solides, la détonation était produite à l'aide de détonateurs au fulminate de mercure de 1 g., 1 g. 5, ou 2 g. suivant les expériences. L'explosion du détonateur était provoquée par une amorce électrique.

II. — Préparation des mélanges gazeux détonants.

1^o *Mélange de sulfure de carbone et d'oxygène.* — Le mélange gazeux que nous avons le plus employé est le mélange de sulfure de carbone et d'oxygène, dans la proportion $CS^2 + 3O^2$. Sa combustion correspond à la relation théorique :



Nous le préparons en faisant passer un courant d'oxygène dans des barboteurs contenant du sulfure de carbone liquide.

Le tableau suivant donne les valeurs de la tension de vapeur du sulfure de carbone en millimètres de mercure entre — 10^o et + 30^o C, d'après Batelli : (1)

(1) *Mém. della Acc. di Torino*, (2) 41, I, 1890 et 42, I, 1891.

Température	Tension
— 10°	79,68
0°	128,39
+ 10°	198,01
+ 20°	296,48
+ 30°	432,76

En construisant la courbe correspondant à ce tableau, on voit que la tension de vapeur du sulfure de carbone est égale au quart de la pression atmosphérique ordinaire, à une température légèrement supérieure à 9°5. Donc pour avoir un mélange gazeux ayant la composition désirée, il suffit de saturer le courant d'oxygène par du sulfure de carbone maintenu à 9°5 : c'est ce que nous avons fait pour un certain nombre d'expériences. Mais deux difficultés se présentent. D'abord, les saturateurs doivent être maintenus à une température qui est inférieure de 7° à 8° environ à la température ordinaire du laboratoire. De plus et surtout, la saturation complète d'une quantité donnée d'oxygène exige un temps assez considérable, surtout dans les expériences pour lesquelles on doit pouvoir disposer de plusieurs litres de mélange détonant.

Aussi avons-nous trouvé bien plus simple, et d'une précision suffisante pour nos expériences, d'opérer de la manière suivante. L'oxygène (provenant de tubes d'oxygène comprimé du commerce) passe dans deux flacons barboteurs, contenant du sulfure de carbone. Ces deux barboteurs sont plongés dans de l'eau maintenue à 15°. A cette température la tension de vapeur du sulfure de carbone est un peu supérieure à celle qui correspond à la composition désirée pour le mélange gazeux. Mais, en réglant la vitesse du courant d'oxygène, on arrive facilement par tâtonnements à trouver la vitesse pour laquelle, à cette température, l'oxygène se sature exactement de la quantité voulue de sulfure de carbone. D'ailleurs cette vitesse de courant gazeux, déterminée une fois pour toutes (quatre bulles par seconde dans nos expé-

riences) est facile à reproduire à chaque expérience, à l'aide de la vis micrométrique des tubes d'oxygène.

Pour vérifier que le mélange gazeux avait bien la composition désirée, nous avons employé la méthode suivante. L'oxygène est absorbé par le pyrogallate de potasse. Pour éviter la condensation du sulfure de carbone, au moment de l'absorption de l'oxygène, on ajoute au préalable au mélange gazeux une quantité connue d'azote. Après absorption de l'oxygène par le pyrogallate de potasse, on en déduit aisément la quantité de sulfure de carbone existant dans le mélange primitif.

Exemple d'une analyse :

Volume gazeux introduit dans l'éprouvette (sulfure de carbone et oxygène)	16 cm ³
Volume d'azote ajouté	15 cm ³
Soit dans l'éprouvette un volume gazeux de	31 cm ³
Après introduction de pyrogallate de potasse, volume ramené à	18 cm ³ 95

D'où :

Oxygène.	12 cm ³ 05 soit 75,3 o/o
Sulfure de carbone	3 cm ³ 95 soit 24,7 o/o

2° *Mélange d'hydrogène et d'oxygène.* — Ce mélange était préparé dans un gazomètre dans lequel on introduisait les gaz (hydrogène et oxygène dans la proportion 2 : 1). Ils étaient desséchés par passage dans un flacon laveur d'acide sulfurique.

3° *Mélange de méthane et d'oxygène.* — Ce mélange était, comme le précédent, préparé à l'avance, en introduisant dans un gazomètre, d'une part l'oxygène (2 volumes) et d'autre part le méthane (1 volume). Celui-ci était préparé par l'action, au rouge, de la chaux sodée sur l'acétate de soude fondue. Il était purifié en le faisant passer dans des flacons laveurs à acide sulfurique, pour le débarrasser des carbures éthyléniques qui se forment dans la même réaction.

CHAPITRE II

La formation de l'onde explosive.

Lorsqu'on enflamme un mélange gazeux détonant, l'onde explosive ne se développe pas aussitôt. Si l'on opère dans un tube cylindrique, celui-ci est d'abord parcouru par une flamme dont la vitesse de propagation va en croissant, puis à un moment donné l'onde explosive prend naissance, et à partir de ce moment elle se propage dans le tube à une vitesse rigoureusement uniforme.

Berthelot a, le premier, entrepris des recherches sur cette période d'état variable qui précède le régime de détonation et sur les conditions d'établissement de l'onde explosive ⁽¹⁾. Ses expériences ont porté sur le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, qu'il faisait exploser dans des tubes de caoutchouc de 5 mm. de diamètre en l'enflammant par une étincelle électrique. Dans ce cas, l'onde explosive se forme après un parcours un peu supérieur à 50 cm.

Berthelot a aussi étudié, au moins qualitativement, l'influence du mode d'inflammation sur la formation de l'onde explosive ⁽²⁾. De ses expériences il conclut que l'établissement d'un régime régulier ne se fait bien que si les étincelles qui enflamment les gaz sont assez puissantes ; avec des étincelles très faibles, la période d'état variable peut se prolonger sur des longueurs de plusieurs mètres.

M. Le Chatelier a étudié comment varie la longueur de

⁽¹⁾ BERTHELOT et VIEILLE, *C. R.*, t. XCV, 1882, p. 199.

⁽²⁾ BERTHELOT, *Sur la force des matières explosives*, t. I, p. 162.

la période qui précède la naissance de l'onde explosive en fonction de la composition du mélange gazeux. Ses expériences ont porté principalement sur les mélanges d'acétylène avec l'oxygène et les composés oxygénés de l'azote ⁽¹⁾. Avec des tubes de 10 mm. de diamètre intérieur, l'onde explosive prend spontanément naissance après les parcours suivants de la flamme :

2 C ² H ² +	O ² .	1 m.	C ² H ² +.	2AzO.	0 m. 20
C ² H ² +	O ² .	0 m. 05	C ² H ² +	6AzO.	0 m. 50
C ² H ² +	6O ² .	0 m. 15	C ² H ² +	2AzO.	1 m.
C ² H ² +	10.O ² .	0 m. 80	C ² H ² +	6Az ² O	0 m. 10

Comme on le voit d'après ces chiffres, la nature et la composition du mélange gazeux ont une très grande influence sur la longueur sur laquelle s'étend la période de combustion.

Dixon a reconnu que le temps au bout duquel s'établit l'onde explosive dans un tube dépend aussi de la position de l'étincelle dans ce tube ; il n'est pas le même suivant que l'étincelle jaillit à l'extrémité fermée du tube, ou bien à une certaine distance de cette extrémité. Ainsi, dans un tube contenant le mélange 2H² + O², si l'on fait jaillir l'étincelle à l'extrémité du tube, l'onde explosive prend naissance à 1 m. 25 de l'étincelle ; et, si l'on fait jaillir l'étincelle à 7 cm. 6 de l'extrémité l'onde se développe, toutes autres conditions égales, après un trajet de 30 cm. De même avec le mélange C²N² + O², ces longueurs sont, dans les mêmes conditions, de 21 cm. 6 et 10 cm. 2.

Influence du diamètre du tube.

Dans toutes les expériences que nous venons de rapporter, il y a un facteur dont l'influence n'a pas été étudiée systéma-

⁽¹⁾ Sur le développement et la propagation de l'onde explosive, *C. R.*, t. CXXX, 1900, p. 1755.

tiquement : c'est le *diamètre du tube* dans lequel se propage le phénomène explosif. En effet suivant la valeur de la mesure de ce diamètre, l'onde explosive s'établit plus ou moins rapidement. Aussi avons-nous entrepris des expériences avec le mélange de sulfure de carbone et d'oxygène, dans le but d'étudier la durée de la période de combustion qui précède la naissance de l'onde explosive, en opérant dans des tubes cylindriques en verre de divers diamètres.

Les tubes que nous avons utilisés étaient en verre ordinaire, et leur diamètre a varié depuis 5 ou 6 mm. jusqu'à 55 mm. Chaque tube avait une longueur d'un mètre. Lorsque cela était nécessaire, deux ou trois tubes étaient mis bout à bout ; ils étaient raccordés à l'aide d'une bande de toile goudronnée de 1 cm. de largeur, enduite de paraffine pour assurer l'étanchéité du joint.

Nos premières expériences nous ont rapidement montré, que plus le diamètre du tube est grand, plus l'onde explosive a de difficultés à s'amorcer. C'est pourquoi nous avons dû limiter nos expériences au diamètre maximum de 55 mm., car au delà nous aurions été conduits à employer de trop grandes longueurs de tubes.

Comme nous le verrons plus loin, la nature de la surface intérieure du tube, dans lequel a lieu l'explosion, a une influence sur la longueur de la période de combustion. Aussi tous les tubes dont nous nous sommes servis étaient-ils bien nettoyés et rincés, puis séchés avant l'expérience.

Le tube était fermé à ses deux extrémités par des bouchons de liège. Il était rempli du mélange détonant par déplacement. A cet effet, le bouchon fermant l'une des extrémités était traversé par un tube de verre de 4 mm. de diamètre environ, par lequel arrivait le mélange gazeux. L'air déplacé s'échappait par l'autre extrémité du tube à travers un tube effilé. L'un des bouchons était traversé par deux fils de cuivre, dont les extrémités étaient distantes de 5 mm. Le mélange explosif était enflammé à l'aide d'une étincelle

jaillissant entre les deux extrémités de ces deux fils de cuivre.

Au moment de l'explosion les deux tubes d'arrivée et de sortie des gaz étaient bouchés. De plus, on mettait devant eux des écrans de manière à n'avoir sur la photographie que l'image du seul tube où se propageait le phénomène étudié.

Le tableau suivant donne les résultats des expériences faites dans ces conditions :

Diamètre intérieur du tube (en mm.)	Longueur de combustion (en cm.)
6,5 — 7	48
16	52
24	58
34	84
43	105
54	131

Ces chiffres sont les moyennes des résultats de plusieurs expériences. En général, pour les tubes de faible diamètre, les longueurs de la période de combustion, ne différaient pas entre elles de plus de 2 à 3 cm. environ. Dans les expériences faites avec les tubes de faible diamètre, la longueur de la période de combustion était relativement faible, et l'on n'avait pas à employer des tubes d'une trop grande longueur. Aussi, dans la plupart de ces expériences, les photographies étaient-elles faites à une distance telle que 5 cm. du tube étaient représentés par 2 mm. sur la photographie et l'on pouvait facilement avoir ainsi une précision de 2,5 cm. dans la mesure des longueurs de combustion. Mais pour les tubes de grand diamètre, où cette longueur de combustion était plus considérable, on devait employer des tubes assez longs et 1 mm. de la photographie représente, en général, 5 cm. du tube ; il était difficile d'avoir une plus grande précision. De plus, les diamètres des tubes ne peuvent pas être définis à plus de 1 mm. Et en effet, même en ne prenant que les tubes d'un même lot, il n'était pas rare, — surtout pour les tubes

de grand diamètre — d'avoir des différences de 2 et même quelquefois 3 mm. de diamètre. Il va sans dire, que nous éliminions de nos expériences les tubes dont le diamètre moyen différait de plus de 1 mm., en plus ou en moins, des chiffres du tableau précédent. De même le diamètre d'un même tube, avait entre les deux extrémités, des valeurs différant en général de 1 mm. C'est pourquoi, les expériences

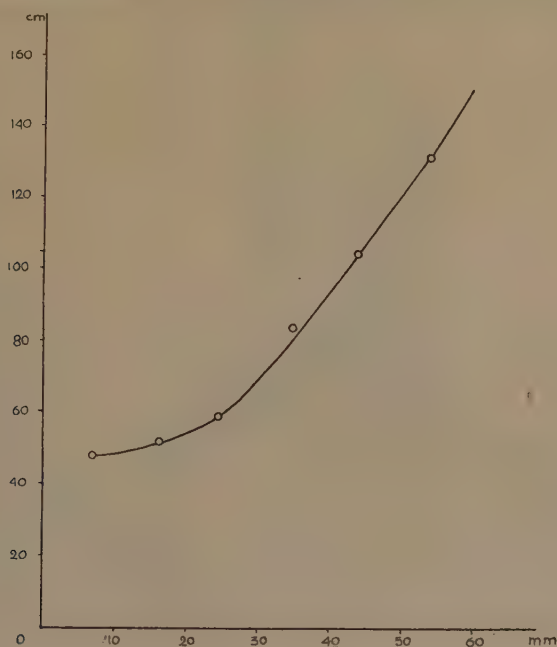


Fig. 7.

faites avec les tubes de grand diamètre nous ont donné, sur les longueurs mesurées, des différences un peu supérieures à celles que nous avons obtenues avec les autres tubes. Ainsi, avec les tubes de 34 mm. et 43 mm. de diamètre, les longueurs de combustion pouvaient différer entre elles, de 5 cm. environ. Quant à la dernière expérience elle n'a été réalisée qu'une seule fois avec un tube de 54-55 mm. de diamètre.

Les résultats portés sur le tableau précédent, peuvent être représentés par une courbe (fig. 7), en portant en abscisses les diamètres des tubes et en ordonnées les longueurs de combustion. On voit sur la courbe qu'à partir d'un diamètre de 25 mm. environ les longueurs de la période de combustion sont sensiblement proportionnelles au diamètre des tubes.

La figure 8 est une reproduction de la photographie d'une explosion se propageant dans un tube de 25 mm. de



Fig. 8. — Formation de l'onde explosive dans un tube de 25 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).

diamètre et de 2 m. de longueur (deux tubes de 1 m. mis bout à bout). Des bandes de papier opaque de 8 mm. à 9 mm. de largeur, collées sur le tube tous les 50 cm., indiquent sur la photographie les longueurs comptées à partir du commencement du tube. On voit sur cette photographie que l'onde explosive a pris naissance après 58 cm. environ du point d'allumage. On voit très nettement à l'endroit de la naissance de l'onde explosive, une onde rétrograde qui s'est propagée en sens inverse dans les gaz chauds, et à une vitesse un peu inférieure à celle de l'onde explosive. C'est une onde

purement mécanique, — une véritable onde de choc — sur le front de laquelle il ne se produit aucune réaction chimique. Elle se propage, en effet, dans des gaz où la combustion a déjà eu lieu. Le point d'intersection de cette onde

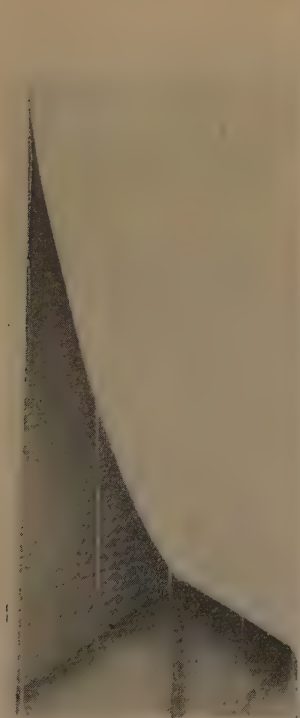


Fig. 9. — Formation de l'onde explosive dans un tube de 43 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).

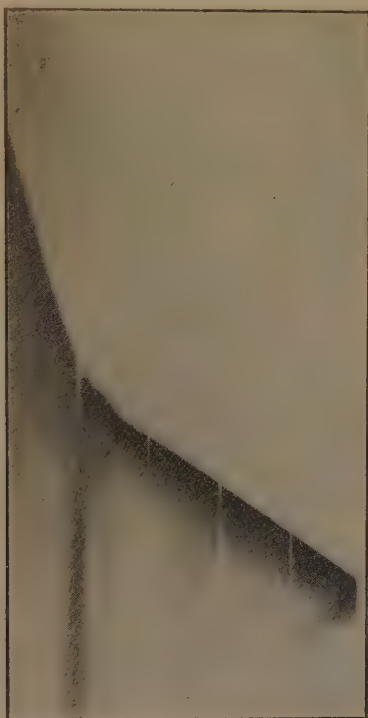


Fig. 10. — Formation de l'onde explosive dans un tube de 55 millimètres de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).

rétrograde avec l'onde explosive, permet de déterminer très exactement, le point où a pris naissance l'onde explosive.

La figure 9 représente une explosion se propageant dans un tube de 43 mm. de diamètre intérieur. Dans ce cas,

l'onde explosive a pris naissance après une période de combustion qui s'est développée sur une longueur de 104 cm. environ. L'onde de choc rétrograde est encore très nettement visible, ainsi qu'une autre onde de choc qui s'est également propagée vers l'arrière à partir de l'extrémité du tube.

De même la figure 10 représente la propagation d'une explosion dans un tube de 54-55 mm. de diamètre, formé de 3 tronçons de 1 m. de longueur raccordés bout à bout. Les 50 premiers centimètres n'ont pas été photographiés, de manière à avoir l'onde explosive sur toute sa longueur. On voit que celle-ci s'est formée à 131 cm. au delà de l'étincelle qui provoquait l'inflammation.

Dans certains cas il peut arriver que la formation de l'onde explosive soit retardée ou avancée. Elle se forme alors après un parcours différent de celui indiqué par l'ordonnée de la courbe de la figure 7. Ceci se présente dans les deux circonstances suivantes :

1° La composition du mélange gazeux diffère de celle avec laquelle ont été faites les expériences résumées par la courbe de la figure 7. Nos expériences ont été faites avec des mélanges gazeux dont la composition correspondait à la formule $CS^2 + 3O^2$. Nous avons cité au début de ce chapitre des expériences de M. Le Chatelier, faites avec des mélanges d'acétylène et d'oxygène dans des proportions variables ; et nous avons vu que les longueurs au bout desquelles l'onde explosive prend naissance, peuvent varier dans le rapport de 1 à 20. C'est dire qu'une faible variation dans la composition du mélange gazeux détonant pourra donner des longueurs de la période de combustion tout à fait différentes. En fait, nous avons constaté que lorsque la température à laquelle était fait le mélange détonant était élevée de 1° C., ce qui augmentait la proportion de sulfure de carbone dans le mélange de 2 o/o environ, il se produisait une perturbation notable dans le phénomène étudié. Ainsi la figure 11 a été obtenue en photographiant l'explosion d'un tube de

24 mm. de diamètre et de 2 m. de longueur, et contenant le mélange de sulfure de carbone et d'oxygène dans la propor-

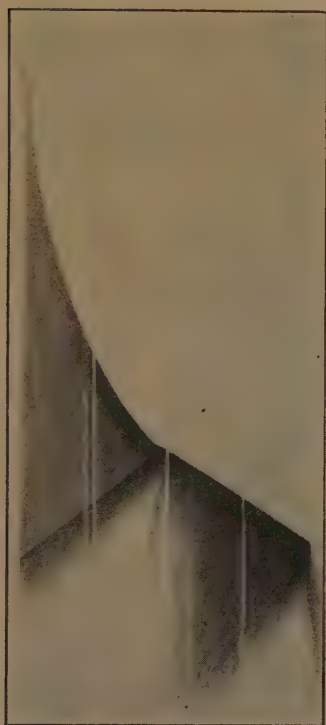


Fig. 11. — Formation de l'onde explosive dans un tube de 25 mm. de diamètre (mélange CS^2 77 o/o : O 23 o/o).



Fig. 12. — Formation de l'onde explosive à la jonction de deux tubes.

tion qui vient d'être indiquée. L'onde explosive ne s'est formée qu'à 92 cm. environ de l'étincelle qui a provoqué l'inflammation, alors qu'avec le mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$ cette longueur était de 58 cm.

2° Si la surface intérieure des tubes dans lesquels se propage le phénomène explosif présente des aspérités, la formation de l'onde peut être avancée. Ainsi dans le cas où l'on a deux tubes bout à bout, à l'endroit de la jonction de ces deux tubes il y a une discontinuité qui peut provoquer la formation de l'onde explosive bien avant le point où elle aurait pris naissance si la surface du tube n'avait pas présenté de discontinuité. Sur la photographie de la figure n° 12 faite avec un tube de 44 mm. de diamètre intérieur, on voit la naissance de l'onde explosive à 1 m. de l'étincelle d'allu-

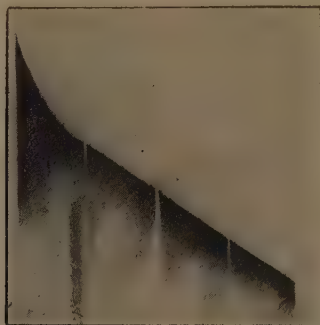


Fig. 13 — Formation de l'onde explosive dans un tube contenant du sable.

mage, exactement à l'endroit de la jonction des deux tubes de 1 m. de longueur chacun et placés bout à bout. Cette longueur était de 105 cm. dans le cas ordinaire. De même si l'on met dans le tube une longue trainée de sable à gros grains (3 mm. environ en moyenne), formant une suite ininterrompue d'aspérités, l'onde explosive se formera après une période de combustion qui se sera développée sur une faible longueur, 45 cm. seulement (au lieu de 58) avec un tube de 23 mm. de diamètre intérieur; la photographie de cette explosion est représentée par la figure 13.

De ces expériences nous pouvons conclure que, pour un

mélange détonant déterminé, et dans des conditions d'inflammation données, *la longueur de la période de combustion qui précède la naissance de l'onde explosive dans un tube cylindrique, dépend seulement du diamètre de ce tube*, lorsque la nature et l'état de la paroi de ce tube sont bien déterminés.

Amorçage de l'onde explosive par le fulminate de mercure.

Nous avons vu, au début de ce chapitre, que Dixon avait étudié l'influence de la position de l'étincelle électrique sur

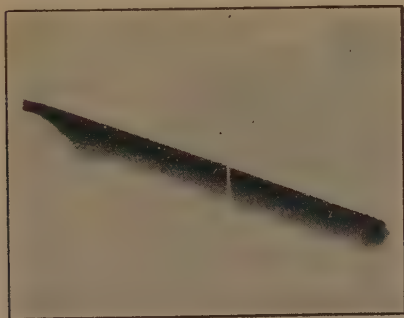


Fig. 14. — Amorçage de l'onde explosive à l'aide de fulminate de mercure.

la longueur de la période de combustion. Pour savoir si, dans certains cas, on pouvait supprimer complètement cette période de combustion, nous avons étudié la formation de l'onde explosive, lorsque l'inflammation des gaz est provoquée à l'aide d'un détonateur au fulminate de mercure. Le fulminate de mercure a la propriété de communiquer immédiatement le régime de la détonation aux explosifs solides au contact desquels on le fait détoner. On supprime ainsi la période de déflagration. Berthelot avait bien signalé que le fulminate de mercure aidait la colonne gazeuse à prendre

rapidement le régime de l'onde explosive ⁽¹⁾, mais nous avons voulu préciser et étudier ce fait par la méthode photographique.

La photographie reproduite par la figure 14 a été obtenue par la détonation d'un tube de 24 mm. de diamètre et d'un mètre de longueur rempli du mélange gazeux $\text{CS}_2 + 3\text{O}_2$. L'amorçage a été produit à l'aide d'un détonateur de 1 g. de fulminate de mercure. Après une très courte période, de 2 à 3 cm. environ, pendant laquelle l'onde explosive s'est propagée à la faveur d'une onde de choc (produite par la capsule de fulminate de mercure), à une vitesse assez élevée (2500 m./sec. environ), elle s'est ensuite propagée à la vitesse rigoureusement constante de 1800 m. par seconde jusqu'à l'extrémité du tube.

Avec d'autres mélanges gazeux, comme le mélange tonnant $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, on obtient des photographies tout à fait semblables : *l'inflammation à l'aide d'un détonateur au fulminate de mercure communique immédiatement le régime de la détonation au mélange explosif, et, de ce fait, la période de combustion se trouve supprimée.* Nous avons appliqué cette propriété à des expériences qui seront rapportées dans un chapitre ultérieur.

⁽¹⁾ BERTHELOT, *Sur la force des matières explosives*, t. I, p. 162.

CHAPITRE III

La propagation de l'onde explosive.

Berthelot a fait un grand nombre d'expériences sur la propagation de l'onde explosive. Ses expériences ont porté, en particulier, sur la disposition du tube dans lequel se propage le phénomène explosif, sur la matière dont il est formé, sur son diamètre et sur sa longueur ⁽¹⁾.

Que l'onde explosive se propage dans un tube rectiligne d'une quarantaine de mètres de longueur, ou que ce tube soit disposé sur une suite d'alignements parallèles et horizontaux, séparés par des coudes à rayon de courbure notable, le temps mis par l'onde explosive pour parcourir la même longueur dans ces deux tubes, ne diffère que d'une quantité inférieure aux limites d'erreur moyenne des expériences. D'ailleurs Dixon, dans ses premières expériences, employait un tube enroulé sur un tambour de 60 cm. de diamètre, et les chiffres qu'il a obtenus sont tout à fait comparables à ceux de Berthelot. On peut donc admettre, que la forme du tube dans lequel se propage l'onde explosive, n'a pas d'influence sur sa vitesse, pourvu toutefois qu'il ne comporte pas des courbures de trop faible rayon, et que son diamètre soit partout le même.

Il résulte encore des expériences de Berthelot que la vitesse de propagation de l'onde explosive est la même, que celle-ci se propage dans un tube de plomb ou dans un tube de caoutchouc, dont les parois sont suffisamment épaisses pour supporter une pression intérieure de plusieurs atmo-

⁽¹⁾ *Ann.*, 5^e série, t. XVIII, 1883, p. 289.

sphères sans déformation sensible (caoutchouc à vide). Cette vitesse est encore la même lorsque l'onde explosive se propage dans un tube de verre, comme cela résulte de la comparaison des mesures de Berthelot avec celles de Mallard et Le Chatelier ou de Dixon.

D'autre part, nous avons déjà vu que la vitesse de l'onde explosive est indépendante du diamètre du tube dans lequel elle se propage, pourvu qu'il ne soit pas trop faible.

De tout ceci nous pouvons conclure que, pourvu qu'il n'y ait aucune discontinuité dans le tube dans lequel se propage l'onde explosive, une fois celle-ci amorcée elle continuera à se propager indéfiniment, et ceci avec une vitesse rigoureusement uniforme.

Il reste donc à étudier dans quels cas et dans quelle mesure, une discontinuité quelconque peut influencer sur la propagation des détonations dans des mélanges gazeux contenus dans des tubes cylindriques.

I. — Influence de la variation du diamètre.

1. Influence d'une brusque augmentation du diamètre. — Une discontinuité qui a une grande influence sur le régime de la propagation de l'onde explosive, c'est la variation brusque du diamètre du tube dans lequel se propage la détonation.

Nous avons entrepris cette étude lorsqu'a paru un mémoire de C. Campbell sur la propagation de l'onde explosive dans des mélanges gazeux contenus dans des tubes de section variable ⁽¹⁾. Des expériences qu'il a faites avec un certain nombre de mélanges gazeux divers ($H^2 + O^2$, $2H^2 + 3O^2$, $2H^2 + 4O^2$, $3CS^2 + 5O^2$, etc.), on peut conclure que si une onde explosive se propage dans un tube dont la section augmente brusquement, la vitesse de l'onde est con-

(1) C. CAMPBELL, *Chem. Soc.*, t. CXXI, part. 2, 1922, p. 2483.

sidérablement abaissée, ou plutôt la détonation cesse de se propager dans le second tube et fait place à une déflagration. Ainsi, l'onde explosive se propage dans le mélange $C^2N^2 + O^2 + 2N^2$ à la vitesse de 2230 m. par seconde. Si cette propagation a lieu dans un tube de 10 mm. de diamètre, et si on a soudé à l'extrémité de ce tube un autre tube de 22 mm. de diamètre, la vitesse de propagation de la flamme dans ce second tube est abaissée à 590 m. par seconde; elle est abaissée à 340 m. par seconde si le diamètre du second tube est 65 mm. Mais dans le cas contraire, où l'onde explosive se propage à l'intérieur d'un tube dont la section diminue brusquement, il n'y a aucun changement appréciable dans la vitesse de l'onde après la jonction des deux tubes.

La figure 15 est la reproduction d'une photographie que nous avons obtenue avec le mélange $CS^2 + 2O^2$. Un tube de 7 mm. de diamètre intérieur et d'un mètre de longueur était prolongé par un tube de 34 mm. de diamètre intérieur et de même longueur. L'onde explosive a pris naissance dans le premier tube après un parcours qui n'a pas été photographié. Elle s'est ensuite propagée à vitesse uniforme dans ce premier tube; mais, à l'endroit de la jonction des deux tubes, elle a fait place à une combustion à vitesse de propagation plus faible et légèrement accélérée.

Nous pouvons expliquer ces résultats de la manière suivante. Au moment où l'onde explosive pénètre d'un tube étroit dans un autre plus large, la pression qui règne sur le front de l'onde subit une brusque détente. Dans ces conditions l'onde explosive ne peut plus se propager. Nous avons vu, en effet, que dans l'onde explosive c'est une pression élevée qui se transmet, de sorte que si l'onde explosive se développe dans le second tube, ce ne pourra être qu'après un certain parcours suffisant pour que soit atteinte la pression qui permet la propagation de l'onde explosive. Au contraire, lorsqu'une onde explosive passe d'un tube dans un

autre plus étroit, ce phénomène ne peut se produire, et



Fig. 15. — Arrêt de l'onde explosive à la jonction d'un tube de 7 mm. de diamètre et d'un tube de 34 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 2\text{O}^2$).

l'onde explosive continue à se propager. Le seul phénomène que l'on puisse observer, dans ce cas, c'est le retour en arrière d'une onde de compression réfléchie.

Les mesures rapportées dans le mémoire de C. Campbell nous donnent la vitesse de la propagation dans le second tube, lorsque le diamètre de celui-ci est supérieur à celui du premier tube. Elles nous donnent aussi la vitesse de l'onde de réflexion rétrograde qui se forme au point de jonction de ces deux tubes. Ces expériences ont été faites avec des tubes de quelques décimètres au plus de longueur, et la vitesse donnée pour la propagation de la déflagration dans le second tube, est une vitesse moyenne mesurée sur ce parcours. En général, sur une telle longueur cette vitesse est à peu près constante. Il nous a paru intéressant d'opérer avec des tubes de plus grande longueur, pour pouvoir étudier d'une manière plus complète le phénomène explosif qui se propage dans le second tube et, en particulier, pour déterminer après quel parcours l'onde explosive se reformera dans le second tube.

Dans ce but, nous avons opéré avec des tubes d'un mètre de longueur contenant le mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$. Le premier tube avait un diamètre de 7 mm. environ; le diamètre du second tube a varié depuis 10 mm. jusqu'à 43 mm. Le tube de plus grand diamètre était fermé à une de ses extrémités par un bouchon de liège dans lequel pénétrait le tube de petit diamètre, de sorte que le tube dans lequel se propageait l'explosion passait brusquement du diamètre de 7 mm. à un diamètre supérieur.

Le mélange gazeux était allumé dans le petit tube à l'aide d'une étincelle électrique, comme dans les expériences rapportées dans le chapitre précédent. Dans ces conditions, l'onde explosive prend naissance dans ce tube au bout d'une cinquantaine de centimètres, puis s'y propage à la vitesse constante de 1800 m. par seconde jusqu'à la jonction des deux tubes. C'est une combustion qui lui fait suite dans le second tube, comme nous l'avons expliqué; et, si ce second tube est suffisamment long, à un moment donné une nouvelle onde explosive y prend naissance et s'y propage. En supposant — ce qui a d'ailleurs été le cas dans lequel nous

nous sommes placés dans nos expériences — que le diamètre du premier tube est constant et que c'est celui du second que l'on fait varier, la longueur au bout de laquelle se forme l'onde dans le second tube, dépend du diamètre de ce tube, toutes autres conditions étant égales (composition du mélange, mode d'inflammation, etc.).

Les résultats de nos expériences sont résumés dans le tableau suivant. La première colonne indique le diamètre du second tube. La deuxième donne les longueurs parcourues par la flamme dans ce second tube jusqu'à la naissance de l'onde explosive. La colonne suivante indique la vitesse moyenne de propagation de la flamme sur tout son parcours, jusqu'à la naissance de l'onde explosive, ou bien sur une partie seulement de ce parcours pour les deux dernières expériences.

Diamètre du 2 ^e tube (en m/m)	Longueur de combustion dans le 2 ^e tube (en c/m)	Vitesse moyenne de la flamme (en m/sec)	
13	8	1.250 m/sec.	} vitesse moyenne sur le parcours entier de la lon- gueur de combustion.
16	9	1.200 m/sec.	
24	15	1.000 m/sec.	
33	50	780 m/sec.	sur les 30 premiers c/m.
44	100	235 m/sec.	sur les 50 premiers c/m.

Au sujet de la précision de ces chiffres, on peut faire exactement les mêmes remarques que celles que nous avons déjà faites au chapitre précédent, dans la détermination de la longueur de combustion en fonction du diamètre du tube.

Ces résultats peuvent être transcrits sur une courbe, en portant en abscisses le diamètre du second tube (celui du premier est constant), et en ordonnées les longueurs de la

période de combustion dans ce tube (fig: 16). Cette courbe passe évidemment par l'origine. Pour les grands diamètres elle se rapproche de celle qui donne les longueurs de combustion dans un seul tube ; c'est-à-dire que pour les tubes de très grand diamètre, la longueur au bout de laquelle s'établit

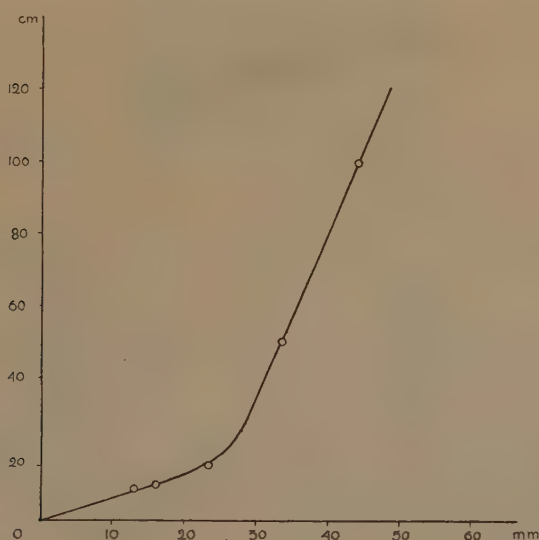


Fig. 16.

l'onde explosive doit être à peu près la même, que la combustion ait été amorcée dans ce tube, soit à l'aide d'une étincelle électrique, soit en y faisant arriver une onde explosive par un tube de petit diamètre.

Les photographies reproduites ici ne comprennent pas la partie du premier tube dans laquelle s'est propagée la combustion : pour ce premier tube, seule l'onde explosive est visible sur la photographie. La figure 17 a été obtenue avec un tube de 7 mm de diamètre intérieur prolongé par un tube de 13 mm. La déflagration qui s'est formée dans le second tube à l'endroit de la jonction, s'est propagée dans ce

tube sur une longueur de 8 cm. environ à une vitesse moyenne de l'ordre de 1 200 m./sec. ; puis l'onde explosive a

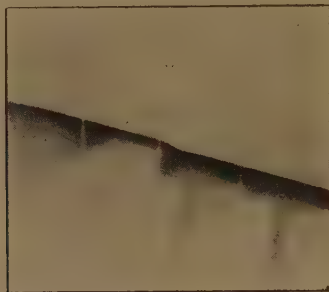


Fig. 17. — Arrêt de l'onde explosive à la jonction de deux tubes de 7 mm. et de 13 mm. de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).

pris naissance et s'est ensuite propagée jusqu'à la fin du tube. Dans la photographie reproduite par la figure 18, le



Fig. 18. — Arrêt de l'onde explosive à la jonction de deux tubes de 7 millimètres et de 24 millimètres de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).



Fig. 19. — Arrêt de l'onde explosive à la jonction de deux tubes de 7 millimètres et de 33 millimètres de diamètre (mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$).

diamètre du second tube était de 24 mm. ; l'onde explosive ne s'y est reformée qu'après une longueur de 15 cm. qui ont été parcourus par la flamme à la vitesse moyenne de 1 000 m./sec. environ. Dans la photographie de la figure 19, l'onde explosive a pris naissance dans le second tube de 33 mm. de diamètre après une longueur de 50 cm., dont les 30 premiers centimètres ont été parcourus à une vitesse moyenne de l'ordre de 780 m./sec.



Fig. 20. — Arrêt de l'onde explosive à la jonction de deux tubes de 7 mm. et de 24 mm. de diamètre (mélange $H^2 + O$).

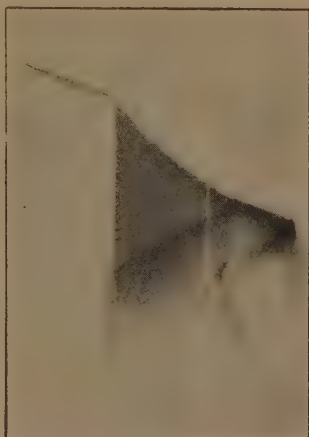


Fig. 21. — Arrêt de l'onde explosive à la jonction de deux tubes de 7 mm. et 35 mm. de diamètre (mélange $H^2 + O$).

Nous avons fait aussi quelques expériences avec le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène ($2H^2 + O^2$), lequel nous a donné des résultats tout à fait semblables. Ainsi, avec un tube de 7 mm. de diamètre intérieur aboutissant dans un tube de 24 mm., l'onde explosive s'est reformée dans ce second tube après une longueur de 15 cm. (fig. 20), comme dans le cas du mélange de sulfure de car-

bone et d'oxygène. Si le diamètre intérieur du second tube est de 35 mm., l'onde explosive n'y prend naissance qu'après une période de combustion s'étendant sur 60 cm. (fig. 21).

2. Influence d'une brusque diminution du diamètre. — Nous avons fait des expériences, dans lesquelles l'onde explosive se propageait d'abord dans un tube de large diamètre.

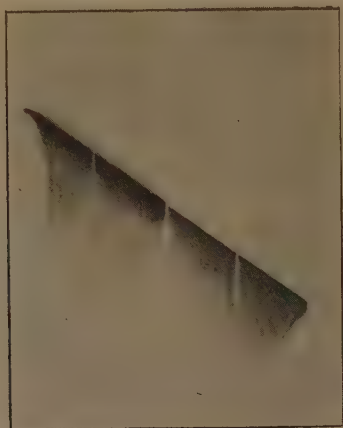


Fig. 22. — Propagation de l'onde explosive dans un tube de verre contenant le mélange $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$.

puis dans un tube plus étroit, ce qui nous a permis de vérifier que dans ce cas il n'y a aucune perturbation dans la propagation de l'onde explosive : celle-ci continue à se propager à la même vitesse que dans le premier tube. La photographie reproduite par la figure 22 a été obtenue avec deux tubes d'un mètre de longueur chacun et contenant le mélange $\text{CS}_2 + 3\text{O}_2$. Le premier avait un diamètre intérieur de 25 mm. ; celui du second était de 7 mm. Dans cette expérience l'amorçage de l'onde dans le premier tube a été obtenu à l'aide d'une capsule de 1 g. de fulminate de mercure qui, comme nous l'avons déjà montré, établit instantanément l'onde explosive.

nément le régime de l'onde explosive. On voit sur cette photographie qu'il n'y a eu aucune perturbation au point de jonction des deux tubes, les deux lignes droites limitant l'image de l'onde dans chacun des tubes étant rigoureusement parallèles. Elles ne sont pas exactement dans le prolongement l'une de l'autre : il y a un léger décalage provenant de la différence des diamètres des deux tubes.

II. — Influence de la nature et de l'épaisseur des parois.

Ces résultats peuvent servir à expliquer le retard qui se produit dans la propagation de l'onde, au moment du passage de celle-ci d'un tube de verre dans un tube de caoutchouc. En effet, si le tube de verre pénètre dans celui de caoutchouc, il y a à la jonction une variation de diamètre correspondant à l'épaisseur des parois du tube de verre. Pour certains mélanges, la détente qui se produit est suffisante pour que l'onde cesse de se propager, et ne se reforme qu'après un certain parcours, en général assez court, car la différence des diamètres à la jonction est relativement faible, surtout si le tube de caoutchouc a exactement le même diamètre que le tube de verre. De plus, dans ce dernier cas, le tube de caoutchouc qui est distendu sur quelques centimètres, va en se rétrécissant, et reprend rapidement son diamètre primitif, ce qui favorise la formation de l'onde explosive,

C'est ainsi qu'on peut expliquer les résultats obtenus par M. Audibert dans les expériences qu'il a faites avec certains mélanges gazeux ⁽¹⁾. Il opérait de la manière suivante. Le mélange gazeux était contenu dans un tube formé de trois tronçons de même diamètre intérieur, le tronçon médian

(1) AUDIBERT, Sur le mécanisme de la réaction explosive, *C. R.*, t. CLXXVIII, 1924, p. 1275.

étant en caoutchouc. La détonation était amorcée à l'une des extrémités de l'un des tronçons de verre, et la flamme photographiée sur un tambour tournant. L'image obtenue dans ces conditions, était formée de deux traces lumineuses rectilignes parallèles séparées par un intervalle obscur, correspondant au tronçon en caoutchouc. Selon que ces deux droites sont, ou non, dans le prolongement l'une de l'autre, la loi de la propagation est, ou n'est pas la même dans le caoutchouc que dans le verre.

Pour certains mélanges gazeux, comme le mélange tonnant $2\text{H}^2 + \text{O}^2$, M. Audibert obtient deux images exactement alignées. Mais si on ajoute de l'azote à ce dernier mélange, par exemple si l'on opère avec le mélange $2\text{H}^2 + \text{O}^2 + \text{N}^2$, on observe un décalage qui correspond à une vitesse de propagation de l'explosion dans le caoutchouc notablement inférieure à la vitesse de détonation dans le verre. On a donc eu dans le caoutchouc — sur une certaine longueur — propagation d'une déflagration et non d'une détonation. D'ailleurs le mélange $2\text{H}^2 + \text{O}^2 + \text{N}^2$ est un mélange assez peu combustible, puisqu'il contient une assez forte proportion d'azote qui dilue le mélange tonnant $2\text{H}^2 + \text{O}^2$, et il n'est pas surprenant que, dans ces conditions, une discontinuité arrête l'onde explosive, alors que la même discontinuité ne l'arrête pas dans le mélange tonnant $2\text{H}^2 + \text{O}^2$. M. Audibert signale aussi qu'il a obtenu le même résultat avec le mélange $\text{CH}^4 + 2\text{O}^2$.

Nous avons repris ces mêmes expériences avec un dispositif tout à fait semblable à celui de M. Audibert. La photographie reproduite par la figure 23 a été obtenue avec un tube de 2 m. de longueur et de 12 mm. de diamètre intérieur, contenant le mélange $\text{CH}^4 + 2\text{O}^2$. Ce mélange a été allumé à une extrémité du tube à l'aide d'une étincelle électrique. L'onde explosive s'est formée après un parcours de 60 cm. environ, puis s'est propagée jusqu'à l'autre extrémité du tube à la vitesse uniforme de 2300 m. par seconde envi-

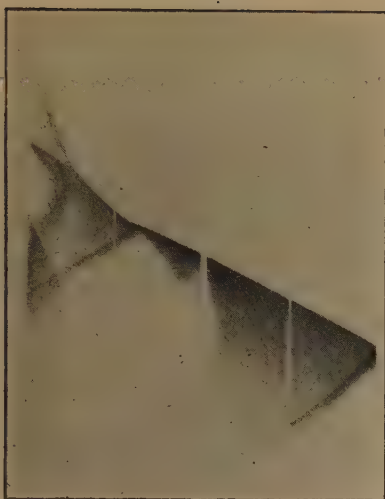


Fig. 23. — Propagation de l'onde explosive dans des tubes de verre contenant le mélange $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$.

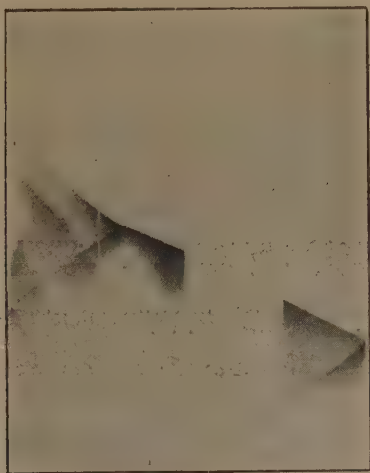


Fig. 24. — Propagation de l'onde explosive dans deux tubes de verre réunis par un raccord en caoutchouc et contenant le mélange $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$.

ron. La photographie de la figure 24 a été obtenue avec un tube de même diamètre, rempli du même mélange détonant, mais formé de trois tronçons, le premier d'un mètre de longueur, les deux autres de 50 cm., le tronçon médian étant en caoutchouc (feuille anglaise souple de 1 mm. d'épaisseur). L'onde explosive s'est encore formée dans le premier tube après un parcours de 60 cm., puis s'est propagée à vitesse constante jusqu'à la jonction du tube en caoutchouc. Au delà l'interruption correspond au tube de caoutchouc; et enfin on voit la partie de l'image correspondant à la propagation de l'onde explosive dans le dernier tronçon du tube en verre. On constate sur cette photographie, que les deux images de l'onde explosive dans les deux parties des tubes en verre sont dans le prolongement l'une de l'autre. D'ailleurs les deux figures 23 et 24 sont exactement superposables. L'onde explosive n'a donc pas été interrompue à son passage dans le tube de caoutchouc. Ce résultat est en contradiction avec celui de M. Audibert. Il est probable que dans ses expériences l'épaisseur des parois des tubes de verre devait être plus grande que celle des tubes que nous avons utilisés. Dans cette hypothèse, à la jonction des tubes de verre et de caoutchouc, il y a une augmentation suffisante du diamètre pour arrêter l'onde explosive qui ne se reformera qu'après un parcours de plusieurs centimètres.

Pour vérifier l'exactitude de cette explication, et en particulier pour voir si le retard observé par M. Audibert ne pouvait pas être attribué à la faible épaisseur des parois du tube de caoutchouc qu'il a utilisé, nous avons fait des expériences en employant des tubes à parois transparentes et très minces en acétate de cellulose.

Nous avons dans ce cas obtenu des photographies analogues à celles que nous avons reproduites dans le cas d'une brusque augmentation du diamètre. Il en a été ainsi, en particulier, avec un tube de verre de 9 mm. de diamètre intérieur, prolongé par un tube en acétate de cellulose dont les

parois avaient une épaisseur de 14/100 de mm.. Ces deux tubes contenaient le mélange $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$. Il y a, à l'endroit de la jonction des deux tubes, une période de combustion s'étendant sur une longueur de 10 cm. environ. Au delà l'onde explosive s'est reformée et s'est propagée dans le tube d'acétate de cellulose à la même vitesse que dans le tube de verre, c'est-à-dire à raison de 2 300 m./sec.

De ces expériences on doit conclure que *la vitesse de l'onde explosive est indépendante de la nature et de l'épaisseur des parois, même dans le cas des parois les plus minces.* Dans les cas où on a constaté des différences de vitesse, nos expériences montrent qu'on doit les attribuer à la variation du diamètre des tubes dans lesquels se propage le phénomène explosif.

III. — Influence de la température.

L'influence de la température initiale du mélange gazeux détonant sur la vitesse de propagation de l'onde explosive, a été étudiée par Dixon. Ses recherches ont porté sur les mélanges tonnants $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $\text{C}^2\text{H}_4 + 2\text{O}_2$, et $\text{C}^2\text{N}_2 + \text{O}_2$, à 10° et à 100°C. Les résultats qu'il a obtenus sont résumés dans le tableau suivant, où les vitesses sont exprimées en mètres par seconde, et se rapportent à des expériences faites sous la pression atmosphérique :

Température	$\text{H}_2 + \text{O}$	$\text{C}^2\text{H}_4 + 2\text{O}_2$	$\text{C}^2\text{N}_2 + \text{O}_2$
10° C.	2821	2581	2728
100° C.	2790	2538	2711

On voit qu'une élévation de température diminue la vitesse de l'onde. Cette variation de la vitesse est, il est vrai, assez faible, puisqu'une différence de 90° dans la température

initiale, n'abaisse la vitesse de l'onde que d'une quarantaine de mètres environ, ou même moins.

La théorie de M. Jouguet prévoit la diminution de la vitesse de l'onde pour des températures croissantes. La variation calculée est cependant légèrement plus faible que la variation observée. Mais ceci peut facilement être expliqué par l'incertitude régnant sur les données du calcul.

Les expériences que nous avons entreprises ont eu pour objet d'étudier l'influence de la température initiale sur la propagation de l'onde explosive, jusqu'au voisinage de la température d'inflammation du mélange gazeux, de manière à voir si la loi de Dixon de décroissance de la vitesse de l'onde en fonction de la température entre 10° et 100° peut être généralisée jusqu'au voisinage de la température d'inflammation.

Dans ce but nous avons opéré de la manière suivante. Autour du tube de verre, de 1 m. de longueur et de 11 mm. de diamètre intérieur, dans lequel devait se propager le phénomène explosif à température élevée, était enroulé un fil de nichrome de 7/10 de millimètre de diamètre. Les spires étaient espacées les unes des autres de 8 mm. Le tube était calorifugé par du papier d'amiante enroulé sur plusieurs épaisseurs, mais de telle manière qu'une fenêtre était disposée parallèlement à l'axe du tube. La hauteur de cette fenêtre était de 7 mm. environ, ce qui était suffisant pour permettre l'impression photographique du papier sensible par le phénomène lumineux. Le fil de nichrome était enroulé aussi régulièrement que possible. En effet, dans des expériences préliminaires nous avons constaté que si cette condition n'était pas remplie, on pouvait avoir des différences de température de 50° , et même plus, en des points distants de 15 à 20 cm. Cette cause a même provoqué dans une de nos premières expériences une explosion prématurée.

La température était mesurée à l'aide d'un couple cuivre-constantan par l'intermédiaire d'un millivoltmètre. Dans le

cas auquel nous venons de faire allusion, la température au point où elle était mesurée, était de $475-480^{\circ}$, et puisqu'il y a eu explosion, c'est qu'en un point elle avait dû atteindre 550° , température d'inflammation du mélange $H^2 + O$. A partir de ce point l'explosion s'est alors communiquée dans tout le tube chauffé et de là aux tubes d'adduction des gaz, sur une longueur totale de 4 m. environ. Dans les expériences ultérieures, nous mesurons la température en différents points du tube. Celle-ci était comprise dans un intervalle de 25° environ. Elle était réglée en faisant varier l'intensité du courant parcourant le fil de nichrome.

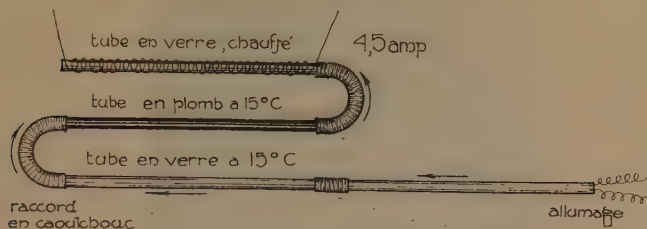


Fig. 25

Parallèlement au tube chauffé était disposé un premier tube à la température ordinaire (fig. 25). Ces deux tubes étaient réunis à l'aide d'un tuyau de plomb et de raccords en caoutchouc, ayant tous le même diamètre intérieur, soit 11 mm. L'inflammation était provoquée par une étincelle électrique à l'extrémité d'un premier tube qui n'était pas photographié. Par suite de la disposition des tubes, l'onde explosive qui s'était formée dans le tube non photographié, parcourait le tube froid, puis le tube chauffé, tous deux dans le même sens. De là sorte, si l'onde explosive se propage à la même vitesse dans les deux tubes, on doit avoir sur la photographie deux images limitées par des droites parallèles. C'est d'ailleurs ce que nous avons vérifié dans une expérience préliminaire faite avec deux tubes à la température ordinaire (15° environ).

Nous avons fait avec le mélange $2\text{H}^2 + \text{O}^2$ des expériences à $450\text{--}475^\circ \text{C.}$ environ. La figure n° 26 est la reproduction d'une photographie obtenue dans ces conditions. L'image supérieure représente la propagation de l'onde explosive dans le tube à la température ordinaire. L'image inférieure, qui représente le phénomène explosif lumineux qui s'est propagé dans le second tube, met également en évidence la

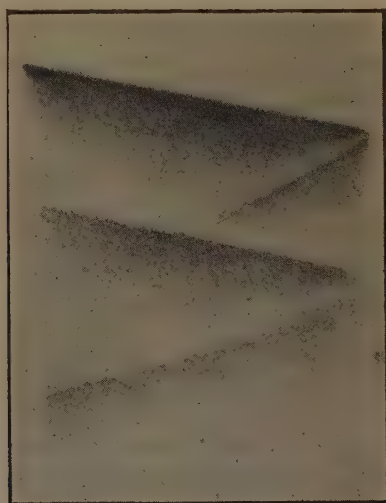


Fig. 26. — Propagation de l'onde explosive à 15° et à 475° (mélange $\text{H}^2 + \text{O}$). Des ondes condensées rétrogrades se sont formées à la jonction des tubes de verre, et aux raccords.

propagation d'une onde explosive dans ce tube à $450\text{--}475^\circ$. L'intensité de cette seconde image est plus faible par suite de la présence du calorifuge sur une grande portion de la circonférence du tube, et par suite aussi du fil conducteur entourant le tube. On voit, en effet, très nettement sur les clichés originaux, des lignes fines et parallèles correspondant à cet enroulement, ce qui contribue à donner à l'image une teinte grise.

Si on mesure l'inclinaison des deux images sur l'horizontale, on constate que l'image inférieure est plus inclinée que l'image supérieure : la vitesse de l'onde explosive dans les gaz chauds est inférieure à sa vitesse dans les gaz à la température ordinaire, résultat conforme à celui de Dixon. L'image correspondant au tube à 475° a une inclinaison sur l'horizontale, supérieure d'un peu moins de 1 mm. à l'image

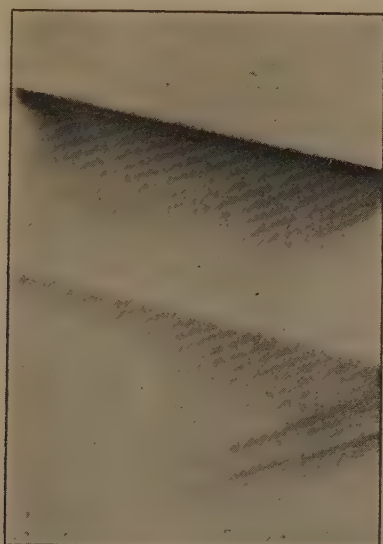


Fig. 27. — Propagation de l'onde explosive à 15° et à 550°
(mélange $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$).

correspondant au tube à la température ordinaire, ce qui correspond à une vitesse de l'onde explosive de l'ordre de 2 600 m./sec. alors que dans le premier tube à la température ordinaire cette vitesse est de 2 800 m./sec. Pour une augmentation de la température de 450° , nous avons donc une diminution de la vitesse de l'onde de 200 m., soit 45 m. environ par centaine de degrés, en admettant que cette variation de la vitesse soit proportionnelle à la température. Nous

avons vu que Dixon trouve une diminution de 31 m., pour une élévation de la température de 90°. Ces deux résultats sont très concordants, surtout si l'on tient compte de ce que nos mesures étant effectuées sur un tube de 1 m. de longueur, elles sont loin d'avoir la précision de celles de Dixon faites — par une autre méthode, il est vrai, — sur des tubes de plusieurs dizaines de mètres de longueur.

Nous avons entrepris des expériences semblables avec le mélange de méthane et d'oxygène $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$. La température d'inflammation de ce mélange étant supérieure à 600°, nous avons pu faire une expérience à 525°-550°. Nos résultats sont du même ordre de grandeur que ceux que nous avons obtenus avec le mélange $2\text{H}_2 + \text{O}_2$. La figure 27 est la reproduction d'une photographie dans laquelle le tube inférieur était à 500°-525°, et le tube supérieur à 15°. L'onde qui, dans le tube à la température ordinaire s'est propagée à la vitesse de 2 300 m./sec., ne s'est plus propagée qu'à la vitesse de 2 100 m./sec. environ dans le tube à 500°. Il y a donc une diminution de la vitesse de l'onde de 200 m. pour un intervalle de température de 500°.

En résumé par ces expériences nous avons pu mesurer la vitesse de l'onde explosive à une température supérieure de 500° environ à la température la plus élevée à laquelle on avait fait des mesures. Ces expériences nous ont montré qu'aux températures de 450°-475° pour le mélange oxy-hydrique, et de 525°-550° pour le mélange de méthane et d'oxygène, il y a encore propagation d'une onde explosive. Jusqu'à ces températures, la vitesse de l'onde s'abaisse d'une quarantaine de mètres environ par centaine de degrés. Si nous n'avons pas fait d'expériences à des températures plus élevées, c'est pour éviter les risques d'explosions spontanées à mesure que l'on se rapproche de la température d'inflammation. Mais en élevant la température du mélange gazeux de quelques dizaines de degrés de plus, la vitesse de

l'onde explosive doit encore s'abaisser un peu. Et lorsqu'on atteint la température d'inflammation, il semble que l'onde doive ne plus exister, puisqu'à cette température le mélange explosif doit prendre feu en même temps en tous les points de la masse gazeuse.

CHAPITRE IV

L'onde explosive sphérique.

Toutes les expériences entreprises jusqu'ici sur la propagation de l'onde explosive, aussi bien celles de Berthelot et Vieille que celles de Mallard et Le Chatelier ou celles de Dixon, ont été faites avec des mélanges détonants contenus dans des tubes cylindriques, dont la longueur était telle que, quel que soit leur diamètre, on pouvait admettre très exactement que le mouvement avait lieu par ondes planes, perpendiculaires aux génératrices du tube cylindrique. Aussi nous sommes-nous posé la question de savoir si l'on pouvait étendre les résultats obtenus dans l'étude de la propagation des explosions par ondes planes à la propagation des ondes explosives sphériques. En particulier, l'onde explosive peut-elle prendre naissance, puis se propager, lorsqu'on provoque l'inflammation au centre d'un mélange gazeux occupant un volume suffisamment important, comme par exemple un ballon de verre de plusieurs litres de capacité?

Dans une étude théorique sur les ondes sphériques, M. Jouguet est arrivé à la conclusion que la propagation des explosions par ondes sphériques est fort différente de la propagation des explosions par ondes planes ⁽¹⁾. En particulier, d'après lui, il ne doit pas y avoir, dans le cas des ondes sphériques, d'onde sphérique proprement dite, avançant dans les gaz frais avec une vitesse constante, indépendante du mode de mise de feu. Au contraire, dans ce cas les détonations tendent à s'atténuer et à passer à un régime qui se rap-

(1) *C. R.*, t. CXLIV, 1907, p. 632 et t. CL, 1910, p. 91.

proche des déflagrations. Mais en arrivant à ce résultat, M. Jouguet signale qu'il réclamerait de nouvelles recherches, en particulier une étude expérimentale. Il a, en effet, introduit au cours de son raisonnement diverses hypothèses, qui n'ont pas toutes été établies d'une manière suffisamment rigoureuse. C'est pourquoi il nous a paru intéressant d'entreprendre cette étude expérimentale.

Pour nous mettre dans des conditions telles que l'onde explosive sphérique puisse se développer, l'onde doit être amorcée au centre du récipient contenant le mélange gazeux détonant. Les parois de ce vase doivent se trouver à une distance suffisante, d'abord pour donner une image photographique dont les dimensions peuvent permettre des mesures, et ensuite pour avoir un phénomène se propageant pendant un temps appréciable. Aussi avons-nous opéré avec des ballons de verre de 20 à 26 cm. de diamètre. Nous n'avons pas utilisé de plus grands ballons, car les effets de l'explosion auraient pu ne plus être négligeables, par suite de la projection de nombreux éclats de verre avec une assez forte vitesse initiale.

Pour photographier le phénomène se propageant dans le ballon, il ne fallait pas se contenter de photographier celui-ci sur un papier sensible animé d'un mouvement de translation. On aurait eu, en effet, dans ce cas une image représentant la propagation du phénomène suivant tous les rayons, c'est-à-dire une image fort confuse ne pouvant être interprétée. Aussi avons-nous utilisé le dispositif suivant. Le ballon contenant l'explosif est placé derrière deux fers à « T » situés l'un au-dessus de l'autre, de manière à laisser une fente de 1 cm. de hauteur. Cette fente est disposée de manière telle que son axe se trouve dans le même plan que le grand cercle horizontal du ballon et que l'axe optique de l'objectif photographique (fig. 28). Avec ce dispositif on photographie le phénomène lumineux qui se propage dans le grand cercle horizontal du ballon. Si l'explosion est amor-

cée au centre, on a sur la photographie la représentation du phénomène qui, à partir du centre s'est propagé suivant tous les rayons de ce grand cercle.

Pour amorcer une explosion au centre du ballon, nous avons d'abord songé à y faire arriver un tube de faible diamètre. Le tube et le ballon étant remplis du mélange gazeux détonant, si l'explosion est amorcée à l'extrémité libre du tube, elle se propagera sur toute la longueur de ce tube et arrivera à l'autre extrémité, c'est-à-dire au centre du ballon.

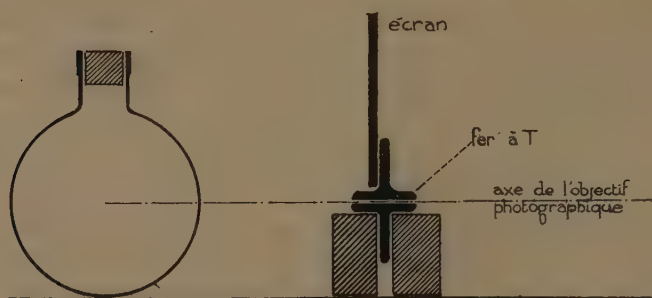


Fig. 28.

De là elle pourra se propager suivant toutes les directions jusqu'aux parois du ballon.

La photographie reproduite par la figure 29 a été obtenue dans ces conditions, avec un ballon de 24 cm. de diamètre, rempli du mélange $\text{CS}_2 + 3\text{O}_2$. Un tube de 7 mm. de diamètre et de 1 m. 20 de longueur arrivait jusqu'au centre. Ce tube était horizontal et son axe parallèle à la fente, ce qui nous a donné sur la photographie à la fois la représentation des phénomènes se propageant dans le tube et dans le ballon. La figure 29 *bis*, qui est une schématisation de la figure 29, nous servira à expliquer le phénomène photographié. La partie de l'image limitée par la droite xo , correspond à la propagation de l'onde explosive dans le tube, l'interruption a ayant été produite par le bouchon. La partie du tube corres-

pendant à la période de combustion qui a précédé la naissance de l'onde explosive n'a pas été photographiée. En o l'onde se propageant dans le tube est arrivée au centre du

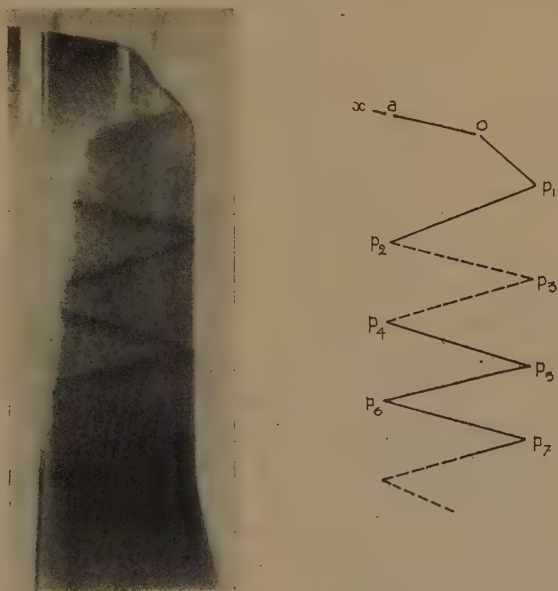


Fig. 29 et 29 bis. — Déflagration du mélange $\text{CS}_2 + 3\text{O}_2$ dans un ballon. Des ondes condensées se sont réfléchies sur les parois jusqu'au moment où celui-ci a éclaté (photographie originale $\times 1,5$).

ballon. Une brusque détente s'est alors produite sur le front de l'onde, et c'est une combustion qui s'est propagée dans le ballon à partir du centre jusqu'à la paroi, suivant op_1 à la vitesse moyenne de 450 m./sec. Ce phénomène est d'ailleurs le même que celui que nous avons déjà étudié, et qui se produit lorsqu'une onde explosive arrive d'un tube de faible diamètre dans un tube de diamètre plus considérable. Mais dans le cas actuel, si l'onde explosive peut se reformer dans le ballon, le diamètre de celui-ci est bien trop faible pour que nous puissions observer ce phénomène. L'onde de

combustion qui s'est propagée dans le ballon suivant op_1 , a donné lieu en arrivant sur la paroi du ballon à une onde condensée rétrograde p_1p_2 , qui s'est propagée dans les gaz encore chauds. Cette onde de choc rétrograde s'est ensuite réfléchi un certain nombre de fois, suivant p_2p_3 , p_3p_4 , ..., p_6p_7 . A ce moment le ballon a éclaté, les gaz chauds ont occupé un plus grand volume, ce qui explique que l'image a alors occupé une plus grande étendue.

Nous avons reproduit cette expérience un certain nombre de fois. Dans tous les cas nous avons obtenu des photographies semblables. On peut donc en conclure que par ce procédé, on ne peut espérer mettre en évidence la propagation d'une onde explosive à l'intérieur du ballon.

Nous avons donc dû imaginer un artifice permettant de donner naissance à une onde explosive au centre du ballon. Pour cela nous nous sommes appuyé sur le fait suivant que nous avons déjà eu l'occasion de signaler : lorsqu'on amorce, dans un tube cylindrique, l'explosion d'un mélange gazeux à l'aide d'un détonateur au fulminate de mercure, la période de combustion est supprimée et l'onde explosive prend immédiatement naissance au contact de la capsule de fulminate. Nous avons donc disposé un détonateur de 1 g. de fulminate de mercure au centre d'un ballon rempli du mélange $CS^2 + 3O^2$. Le détonateur était maintenu à l'aide des fils conducteurs amenant le courant électrique à l'amorce provoquant la détonation du fulminate. Ces fils passaient dans un bouchon de liège paraffiné fermant l'extrémité du col du ballon. La figure 30 est la reproduction d'une photographie obtenue dans ces conditions, avec un ballon de 22 cm. de diamètre. La partie supérieure de l'image photographique a la forme d'un triangle isocèle. Les deux côtés de ce triangle, également inclinés sur l'horizontale, mettent en évidence la propagation d'une *onde explosive sphérique* à partir du centre jusqu'aux parois du ballon. La mesure de l'inclinaison sur l'horizontale d'un des côtés du triangle permet de déterminer

la vitesse de propagation de l'onde dans le ballon. Cette vitesse est de 1800 m. par seconde environ, c'est-à-dire la même que pour une onde plane se propageant dans un tube cylindrique contenant le même mélange détonant.

La forme d'une aire triangulaire provient de ce qu'on photographie la propagation de l'onde dans le plan d'un

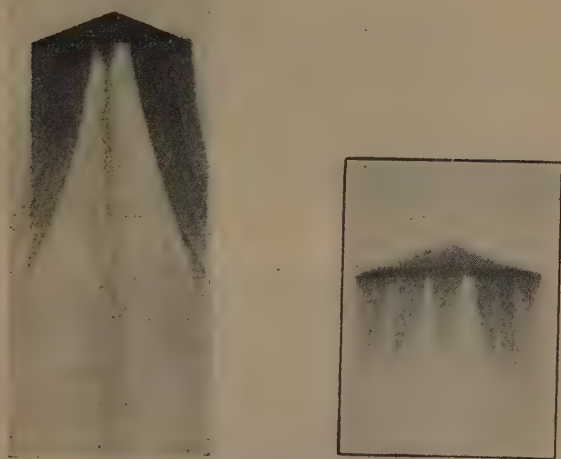


Fig. 30 et 31. — Propagation de l'onde explosive dans un ballon contenant le mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$ (photographie originale $\times 3$).

grand cercle : l'onde se propageant dans toutes les directions à partir du centre du ballon, la durée de l'éclat lumineux doit être maxima au centre et nulle aux extrémités. Dans certaines photographies, comme celle qui est reproduite par la figure 31, la base du triangle est un trait noir très accentué : cela provient d'une onde de choc qui s'est réfléchiée sur la paroi du ballon. Cette onde de choc peut même se réfléchir plusieurs fois, ce qui explique que la partie lumineuse ne se limite pas à la base inférieure du triangle, mais est étendue sur une longueur d'autant plus importante que ces réflexions dans les gaz chauds ont duré plus longtemps. Dans

tous les cas cette longueur sera bien moins étendue quelors-

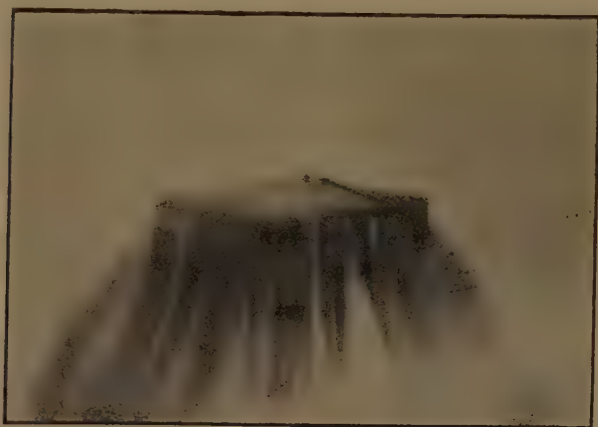


Fig. 32 et 33. — Propagation de l'onde explosive dans un ballon contenant le mélange $H^2 + O$ (photographies originales $\times 3$).

qu'il n'y a pas d'onde explosive, comme ce fut le cas dans l'expérience de la figure 29, car dans ce dernier cas, la

détente est moins importante et les gaz restent chauds et par suite lumineux pendant un temps très notable.

Nous avons aussi fait les mêmes expériences avec le mélange $2\text{H}^2 + \text{O}^2$. Les figures 32 et 33 sont les reproductions de photographies obtenues avec ce mélange, que nous avons fait détoner dans des ballons de 26 cm. de diamètre, avec des détonateurs de 1 g. de fulminate, placés à peu près au centre. Ces photographies mettent encore en évidence l'existence d'une onde explosive sphérique, qui s'est propagée dans toutes les directions à partir de l'amorce de fulminate jusqu'aux parois du ballon.

Nous pouvons donc conclure de nos expériences, qu'en faisant parvenir au centre d'un ballon une onde explosive plane, il n'est pas possible, dans des ballons de quelques litres de capacité de mettre en évidence une onde explosive sphérique. Mais nous avons pu mettre en évidence la propagation d'une onde explosive sphérique à condition d'amorcer la détonation à l'aide d'un détonateur d'une puissance suffisante.

DEUXIÈME PARTIE

LA DÉTONATION DES EXPLOSIFS SOLIDES

L'ONDE DE CHOC

CHAPITRE PREMIER

La propagation des détonations.

Influence de la densité de chargement dans des tubes de faible diamètre.

Nous avons vu que, pour les explosifs solides on pouvait avoir, comme pour les explosifs gazeux, deux modes différents de propagation du phénomène explosif : la propagation par combustion ou déflagration, et la propagation par onde explosive ou détonation.

Nous avons, pour nos recherches, utilisé des explosifs auxquels on peut facilement communiquer le régime de la détonation. Parmi ceux-ci, l'un des plus faciles à amorcer est la dynamite, que nous avons employée sous forme de dynamite n° 1 et dont la composition est la suivante :

Nitroglycérine	75 o/o
Silice (kieselguhr)	25 o/o

La détonation de cette dynamite est très facile à provoquer à l'aide de détonateurs électriques au fulminate de mercure (détonateurs n° 6 de 1 g. de fulminate, et détonateurs n° 7

de 1 g. 5 de fulminate). La dynamite était introduite dans un tube de verre dont le diamètre a varié de 3 mm. à 15 mm., suivant les expériences. En plaçant le détonateur contre l'extrémité du tube, que cette extrémité soit ouverte ou fermée, la détonation est toujours transmise à la dynamite.

Dans toutes les expériences rapportées dans ce chapitre, la longueur de la colonne d'explosif était la même que celle du tube de verre qui la contenait, autrement dit le tube de verre était complètement rempli d'explosif. De plus, il était fermé à l'extrémité opposée à celle où l'on provoquait la détonation.

Nous avons aussi utilisé l'acide picrique et l'explosif Favier n° 1. La composition de ce dernier est la suivante :

Azotate d'ammoniaque. . .	87,4 o/o
Binitronaphtaline	12,6 o/o

La détonation de ces deux derniers explosifs est plus difficile à amorcer que celle de la dynamite, et il était nécessaire d'employer les détonateurs n° 7 (1 g. 5 de fulminate) et même souvent n° 8 (2 g. de fulminate) pour obtenir la détonation complète de la colonne d'explosif. De plus, on ne pouvait se contenter de placer le détonateur contre l'extrémité du tube d'explosif, car la détonation, lorsqu'elle était transmise, ne se propageait pas sur toute la longueur de la colonne d'explosif : le plus souvent elle s'arrêtait après un parcours de 2 ou 3 cm., et le reste de l'explosif était dispersé sans avoir explosé. Pour que l'explosion se transmette d'une manière certaine à toute la masse, le détonateur devait être noyé au milieu de l'explosif, acide picrique ou explosif Favier. Aussi lorsque nous avons opéré avec l'un ou l'autre de ces deux explosifs, le tube qui le contenait était terminé à l'une de ses extrémités par une sorte d'entonnoir rempli d'explosif au milieu duquel était placé le détonateur. En prenant ces précautions, nous n'avons jamais eu de ratés de détonation. Mais l'explosif devait, au préalable, avoir été

bien desséché par un séjour de plusieurs heures dans une étuve à 110°. D'autre part ces explosifs étaient employés à l'état pulvérulent : ils étaient pulvérisés au mortier de porcelaine et passés au tamis 40.

La densité apparente de l'explosif était déterminée avant chaque expérience. Pour cela le volume du tube contenant l'explosif était mesuré en y faisant écouler de l'eau contenue dans une burette graduée en dixièmes de centimètre cube. Le tube était, en outre, pesé à 0 g. 01 près avant et après l'introduction de la matière explosive. La densité était ainsi déterminée avec une précision bien suffisante pour nos expériences.

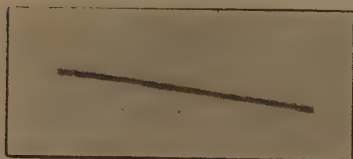


Fig. 34. — Propagation de la détonation de l'explosif Favier.



Fig. 35. — Propagation de la détonation de l'acide picrique.

La photographie reproduite par la figure 34 a été obtenue avec un tube de 50 cm. de longueur et de 7,2 mm. de diamètre intérieur, contenant 14 g. d'explosif Favier à la densité moyenne de 0,68. On voit sur cette photographie que l'image obtenue est parfaitement rectiligne : l'explosion s'est donc propagée sur toute la longueur du tube avec une vitesse rigoureusement uniforme. On a donc bien eu une véritable onde explosive. De plus, l'explosion ayant été amorcée à l'aide de fulminate de mercure, il n'y a pas eu de période de déflagration, et l'on a eu dès le début la détonation de la matière explosive. Cette détonation s'est propagée à raison de 2 600 m./sec.

La photographie reproduite par la figure 35, a été

obtenue avec de l'acide picrique contenu dans un tube de 7 mm. de diamètre, à la densité moyenne de 0,90 sur une longueur de 50 cm. La vitesse à laquelle s'est propagée la détonation a été de 2 500 m./sec. environ. Avec une densité égale à 1,10, cette vitesse est de 2 850 m./sec. environ. Mais en tassant davantage l'explosif, de manière à réaliser une densité de 1,20, le dispositif d'amorçage que nous avons employé est insuffisant pour que la détonation se propage sur toute la longueur de la colonne d'explosif. Et même en employant des tubes de diamètre plus considérable, allant



Fig. 36. — Propagation de la détonation de la dynamite à partir du milieu du tube contenant l'explosif.



Fig. 37. — Propagation de la détonation de la dynamite dans un tube de 4 mm. de diamètre.

jusqu'à 12 ou 13 mm., nous n'avons pu, que rarement, faire détoner des colonnes d'explosif de plus de 10 ou 12 cm. de longueur à des densités de chargement égales ou supérieures à 1,20.

On obtient des photographies analogues aux précédentes avec la dynamite n° 1. Celle qui est reproduite par la figure 36 a été obtenue avec un tube de 50 cm. de longueur et de 6 mm. de diamètre intérieur, rempli de dynamite à la densité moyenne de 0,75. Le détonateur au fulminate a été placé au milieu du tube. De cette façon la détonation s'est propagée à partir de ce point, dans deux sens opposés, vers les deux extrémités du tube. On a ainsi obtenu sur la photographie deux images également inclinées sur l'horizontale. Cette expérience a d'ailleurs été faite dans le but de vérifier

le parallélisme du rail sur lequel on plaçait les tubes d'explosif, avec l'axe du cylindre photographique.

La photographie reproduite par la figure 37 a été obtenue en photographiant l'explosion d'un tube de 3,7 mm. de diamètre et de 50 cm. de longueur contenant 6 g. de dynamite à la densité moyenne de 0,70. La détonation a été amorcée à l'aide d'un détonateur de 1 g. de fulminate. La vitesse de rotation du cylindre photographique était, dans cette expérience de 34,75 m. sec. La détonation s'est propagée à la vitesse de 1 700 m./sec. environ. Dans un tube de même diamètre, mais contenant de la dynamite sous la densité 0,85, la vitesse de la détonation est de 2 000 m./sec. environ. Cette vitesse est de 2 500 m./sec. si la densité de chargement est 1,05. Ces résultats peuvent être résumés à l'aide du tableau suivant, donnant les vitesses de détonation en fonction des densités de chargement dans des tubes de 4 mm. de diamètre.

Δ	0,7	0,85	1,05
V	1700	2000	2500

Ces chiffres ne sont connus qu'à 5 o/o près environ.

En effet, nous n'opérons qu'avec des tubes de 50 cm. de longueur, et la vitesse de translation de notre film était de l'ordre de 40 m. sec. Or on ne peut espérer mesurer l'inclinaison de l'image à plus de 0 mm. 5 près, ce qui correspond à des différences de vitesse de près de 100 m./sec., pour des détonations se propageant à 2 000 m./sec. environ.

On peut néanmoins rapprocher ces résultats de ceux que Dautriche a obtenus par la méthode que nous avons déjà exposée. Le tableau suivant reproduit les chiffres qu'il a obtenus en étudiant la vitesse de propagation de la détonation en fonction de la densité de chargement. Il employait de la dynamite n° 1, contenue dans des tubes de zinc de 2 cm. de

diamètre. La ligne supérieure donne les densités de chargement, et la ligne inférieure les vitesses de l'onde explosive en mètres par seconde.

Δ	0,63	0,79	0,85	1,34	1,54	1,62	1,69	1,71	1,74
V	1991	2397	2563	3670	5230	6794	4207	2480	raté

En portant ces résultats sur une courbe on voit que les chiffres que nous avons obtenus sont inférieurs d'environ 500 m./sec. à ceux de Dautriche. Cela provient très probablement de ce que les tubes que nous avons employés dans ces expériences avaient un diamètre de 4 mm. environ, alors que le diamètre des cartouches employées par Dautriche était de 20 mm. Pour s'assurer de l'exactitude de cette hypothèse, il aurait fallu faire des mesures avec des tubes d'un plus grand diamètre. Mais avec des tubes ayant seulement 12 mm. de diamètre, nous étions obligés de réduire la longueur de la colonne d'explosif à une quinzaine de centimètres, afin de ne pas avoir de trop grandes masses d'explosif. En effet, une cartouche de dynamite de 12 mm. de diamètre et de 15 cm. de longueur pèse 17 g. sous une densité de chargement égale à l'unité. C'est là la masse maxima de dynamite que nous puissions employer sans grands dommages pour nos appareils. Or avec une colonne d'explosif de cette longueur, il est assez difficile de faire des mesures. En plaçant, en effet, le tube contenant l'explosif à 2 m. 50 du cylindre photographique, l'image obtenue avait 10 mm. de longueur, ce qui est insuffisant pour pouvoir faire des mesures. D'autre part nous ne pouvions penser rapprocher davantage la cartouche d'explosif de l'objectif photographique sans risquer de détériorer celui-ci.

Mais l'influence du diamètre sur la vitesse de détonation

a été étudiée par Dautriche sur un autre explosif, la cheddite 60 *bis*. La composition de celle-ci est la suivante :

Chlorate de potasse . . .	80 parties
Huile de ricin. . . .	5 —
Mononitronaphtaline. . .	13 —
Dinitrotoluène	2 —

Avec cet explosif, il a fait deux séries d'expériences. Dans la première la cheddite était contenue dans des tubes de zinc de 50 cm. de longueur et de 20 mm. de diamètre ; dans la seconde le diamètre des cartouches était de 40 mm. Nous avons porté les résultats de ces expériences sur les courbes de la figure 38. La courbe supérieure correspond au diamètre de 40 mm. et la courbe inférieure au diamètre de 20 mm. On voit que ces deux courbes s'écartent de plus en plus au fur et à mesure que l'on se rapproche de la région des grandes vitesses de détonation. De plus pour la courbe supérieure, c'est-à-dire pour le plus grand diamètre, le maximum de la vitesse de détonation est décalé du côté des fortes densités de chargement. Ce résultat peut être rapproché du fait suivant. Nous avons vu qu'avec un amorçage donné, la détonation ne peut se transmettre dans des tubes d'un diamètre déterminé, que si la densité de chargement ne dépasse pas une certaine valeur. On a ainsi, pour cette densité de chargement, la valeur maxima de la vitesse de détonation dans un tube de diamètre donné. Or, d'après les expériences de Dautriche, la vitesse de détonation est fonction du diamètre de la cartouche, en même temps que de la densité de chargement. Donc pour des tubes de faible diamètre, comme ceux que nous avons employés dans nos expériences, cette vitesse maxima doit être relativement faible, puisque nous avons opéré sous des densités de chargement voisines de l'unité. Et en fait, avec des tubes de 4 mm. de diamètre, nous avons vu que la détonation de la dynamite se transmet à la vitesse de 2500 m./sec. Pour cette densité

de chargement, c'est la vitesse maxima que l'on puisse obtenir dans des tubes de ce diamètre, puisqu'au delà la détonation ne se transmet plus. Cette vitesse maxima est bien inférieure à celle que Dautriche a observée dans des tubes

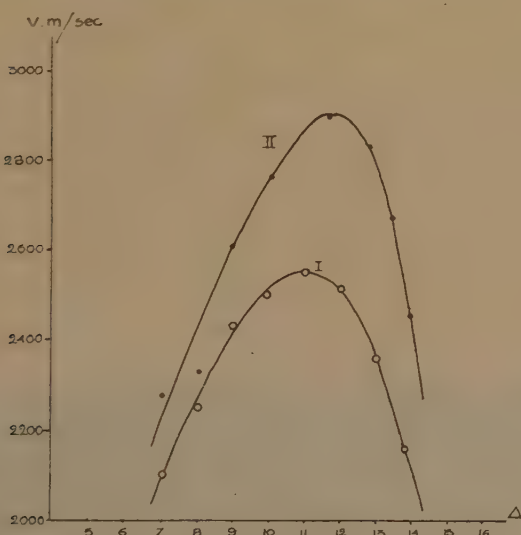


Fig. 38.

de 20 mm. de diamètre, où elle a une valeur voisine de 7000 m./sec., pour une densité de chargement de 1,62.

L'examen de nos photographies permet de formuler une conclusion relative à la durée du phénomène explosif. On peut remarquer en effet que toutes nos photographies sont absolument nettes, c'est-à-dire que l'épaisseur de l'image correspond exactement à la largeur du tube photographié. On pourrait assez facilement observer une différence de 0,5 mm. dans l'épaisseur de l'image. Or pour une vitesse de déplacement du film de 40 m./sec., 0,5 mm. correspond à 1/80.000 sec. Donc après un temps inférieur à 1/80.000

sec. après l'explosion, les gaz dégagés par la réaction explosive se sont déjà détendus d'une manière telle que l'abaissement de température qui en résulte a fait cesser leur luminosité. Il est donc bien probable que *la durée du phénomène explosif est inférieure à 1/80.000 et même 1/100.000 de seconde.*

CHAPITRE II

L'onde de choc.

I. — Propagation de l'onde de choc dans l'air.

Dans toutes les expériences que nous avons décrites dans le chapitre précédent, les explosifs que nous avons employés étaient contenus dans des tubes en verre qu'ils remplissaient complètement. Dans ces conditions, nous avons vu qu'on obtient sur les photographies une image, dont la longueur correspond exactement à la longueur du tube, c'est-à-dire à la longueur de la colonne d'explosif qui a été illuminée par le passage de l'onde explosive.

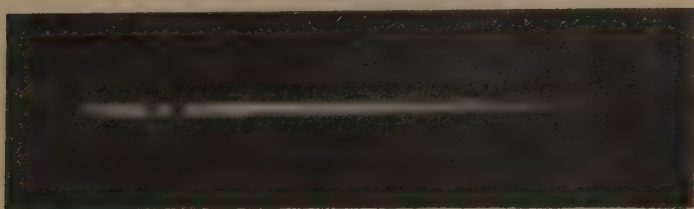


Fig. 39. — Détonation d'une colonne de dynamite de 10 cm. de longueur dans un tube de 1 m. de longueur (Reproduction d'un positif obtenu à l'aide d'un cliché sur plaque immobile).

Lorsqu'on introduit l'explosif dans un tube de verre, de telle manière que la longueur de la colonne d'explosif ne soit qu'une fraction de celle du tube, on obtient une image photographique qui est bien plus étendue que si elle correspondait seulement à l'illumination de la partie du tube dans laquelle se propage la détonation ; autrement dit, *le tube de verre est lumineux bien au delà de la dernière tranche d'explosif*. Ainsi la photographie reproduite par la figure 39

a été obtenue, en photographiant à l'aide d'un appareil ordinaire à plaque immobile, l'explosion d'un tube de verre de 12 mm. de diamètre intérieur et de 1 m. de longueur, contenant 10 g. de dynamite n° 1 sur une longueur de 10 cm. (densité de chargement 0,9). L'image est séparée en deux parties ; celle de gauche correspond à la détonation de l'explosif ; celle de droite correspond à l'illumination de l'air contenu dans le tube. La séparation entre ces deux parties de l'image a été produite par un papier opaque collé sur le tube à l'extrémité de la colonne de dynamite. Celle-ci occupant une longueur de 10 cm. dans le tube, on voit que ce dernier a été illuminé sur une longueur de 55 cm. environ au delà de la fin de la colonne de dynamite.



Fig. 40. — Détonation d'une colonne de dynamite de 10 cm. dans un tube de 80 cm. de longueur.

Nous avons obtenu des photographies tout à fait semblables à cette dernière, en remplaçant la dynamite par de l'acide picrique ou par de l'explosif Favier n° 1. Avec un tube de même diamètre que le précédent et contenant l'un de ces explosifs sous une densité de chargement voisine de l'unité, la longueur de la partie du tube illuminée au delà de l'explosif, est légèrement plus faible qu'avec la dynamite.

Si au lieu d'employer une plaque immobile, on utilise la méthode d'enregistrement qui nous a servi dans toutes nos expériences précédentes, on peut alors comparer la vitesse de propagation du phénomène lumineux qui se propage dans l'air du tube à celle de la détonation de l'explosif. Ainsi la photographie reproduite par la figure 40, a été obtenue en

photographiant l'explosion d'un tube de 13 mm. de diamètre, contenant 15 g. 5 de dynamite sur une longueur de 10 cm. (densité moyenne de chargement 1,10). On voit que le phénomène lumineux qui s'est propagé dans le tube au delà de la partie contenant la dynamite, a impressionné le papier sensible sur une longueur correspondant à 60 cm. La mesure de l'inclinaison de l'image montre que la détonation s'est propagée dans la dynamite à la vitesse de 3200 m./sec. Il est assez difficile de mesurer exactement la vitesse du phénomène lumineux qui s'est propagé dans l'air au delà de la dynamite. Néanmoins on peut l'évaluer sur les

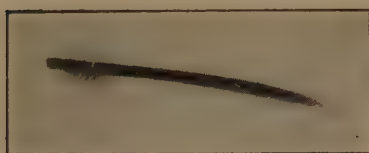


Fig. 41. — Détonation d'une colonne d'acide picrique de 10 cm. dans un tube de 80 cm. de longueur.

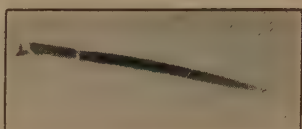


Fig. 42. — Détonation d'une colonne d'explosif Favier de 10 cm. dans un tube de 80 cm. de longueur.

quatre ou cinq premiers centimètres de son parcours à 7000 m./sec. environ avec une erreur inférieure à 10 0/0. En la mesurant sur les dix premiers centimètres on trouve qu'elle est de l'ordre de 6.000 m./sec. Ensuite elle va en décroissant, et sur les dix derniers centimètres elle n'est plus que de 2.000 m./sec. environ. On voit ainsi que sur une grande partie de son parcours, ce phénomène lumineux se propage à une vitesse bien supérieure — environ le double — à celle à laquelle s'est propagée la détonation au sein de l'explosif.

La photographie reproduite par la figure 41 a été obtenue avec un tube de 14 mm. de diamètre intérieur, contenant une colonne d'acide picrique de 10 cm. de longueur à la densité de chargement 1,0. Le tube s'est illuminé sur une

longueur de 50 à 55 cm. environ au delà de l'acide picrique. La photographie de la figure 42 a été obtenue avec un tube contenant une colonne de 10 cm. d'explosif Favier. Dans ce cas le tube n'a été illuminé que sur une longueur de 40 cm. environ. Avec ces deux derniers explosifs, acide picrique et explosif Favier, la vitesse du phénomène lumineux se propageant dans l'air est légèrement plus faible qu'avec la dynamite. Quant à l'amortissement de cette vitesse il est plus rapide qu'avec la dynamite.

Les diverses hypothèses qui permettent d'expliquer ce phénomène pourraient être les suivantes :

1^o L'explosif contenu dans le tube a une certaine tension de vapeur, et ce que l'on observe c'est la détonation de l'explosif à l'état de vapeur.

On ne peut s'arrêter longtemps à cette hypothèse, car les tensions de vapeur des explosifs utilisés sont extrêmement faibles à la température ordinaire, à laquelle étaient faites nos expériences. Pour la nitroglycérine, par exemple, qui entre pour 75 o/o dans la composition de la dynamite que nous avons utilisée (le reste étant constitué par de la silice), cette tension de vapeur est à 20° C. de l'ordre de quelques dix-millièmes de millimètre de mercure (¹). Par conséquent, la quantité de vapeur d'explosif contenue dans le tube est beaucoup trop faible pour pouvoir impressionner la plaque photographique, même si l'on admet — ce qui paraît bien peu probable — que cette vapeur puisse détoner à une concentration aussi faible.

L'expérience suivante permet encore d'éliminer cette hypothèse. Si l'on sépare la colonne d'explosif du reste du tube, soit par une mince pellicule de collodion, soit en collant avec du baume du Canada une lame de mica de 1/10 de millimètre d'épaisseur, on observe toujours sur les pho-

(¹) MARSHALL et PEACE, *Journ. of the Chem. Soc.*, t. CIX, 1916, p. 298.

tographies le même phénomène lumineux et sur la même longueur que lorsque l'explosif n'est pas isolé du reste du tube par une paroi quelconque.

2° On pourrait encore supposer que la détonation de l'explosif lance en avant, soit des gaz chauds, soit des gaz incomplètement brûlés. Dans cette hypothèse ce seraient ces gaz qui impressionneraient le papier sensible.

Nous ne pensons pas que ce puisse être là la raison de l'illumination de l'atmosphère du tube au delà de l'explosif. En effet, nos expériences nous ont montré que, pour une densité de chargement donnée, la longueur de la partie lumineuse est indépendante de la longueur de la colonne d'explosif, lorsque le diamètre du tube reste constant. Ainsi, pour une densité de chargement de 0,9, avec un tube de 12 mm. de diamètre, la longueur de cette partie lumineuse est de 55 à 60 cm. environ que la dynamite occupe dans le tube une longueur de 5, de 10 ou de 13 cm. De même avec un tube de 7 à 8 mm. de diamètre, toujours sous la même densité de chargement, la longueur de la partie lumineuse est de 28 à 30 cm., que la longueur de la partie occupée dans le tube par la dynamite soit de 10, 15, 20 ou 25 cm.

D'autre part, nous verrons que lorsqu'on fait détoner de la dynamite dans un tube, dans lequel on a fait un vide de l'ordre de $1/100^e$ de millimètre de mercure, on n'observe plus de phénomène lumineux au delà de la colonne de dynamite. Ce résultat serait difficilement explicable dans le cas où l'on admettrait que la luminosité est due à des gaz chauds ou incomplètement brûlés projetés en avant par l'explosion.

3° L'hypothèse à laquelle nous nous sommes arrêtés pour expliquer cette luminosité de l'atmosphère du tube est la suivante. En détonant, la dernière tranche d'explosif transmet à la tranche d'air au contact de laquelle elle se trouve une pression très élevée. Cette tranche d'air augmentant de pression dans un temps extrêmement court, se trouve portée

à une température considérable. Elle devient lumineuse et impressionne le papier photographique. A son tour cette tranche gazeuse comprime la tranche suivante qui devient lumineuse, et ainsi de suite, de sorte que l'on a ainsi une véritable **onde de choc** ou de compression, qui se propage dans l'air. On conçoit qu'elle aille rapidement en s'amortissant, puisqu'elle a pris naissance par une seule impulsion qui ne se renouvelle pas.

Le fait que nous avons déjà cité, et d'après lequel ce phénomène ne s'observe pas dans un vide de l'ordre de 1/100^e de millimètre de mercure, est tout à fait d'accord avec cette hypothèse.

La notion de cette onde de choc n'est cependant pas une notion nouvelle. Depuis longtemps on l'a fait intervenir dans l'explication de la transmission de la détonation à distance. Berthelot, entre autres, a développé ce sujet dans son ouvrage sur la force des matières explosives. Plus récemment Dautriche a appliqué la méthode qu'il a imaginée pour la mesure des vitesses de détonation, à la mesure de la vitesse des *ébranlements communiqués à l'air* ⁽¹⁾ par la détonation des cartouches explosives. Les vitesses qu'il a ainsi déterminées sont inférieures à celles que nous avons trouvées. Mais, il mesurait la vitesse d'une véritable onde sphérique, car sa cartouche détonait à l'air libre, tandis que les vitesses que nous avons déterminées sont celles d'ondes planes, se propageant dans un tube de faible diamètre. Dans ce dernier cas l'amortissement est bien moindre que pour des ondes sphériques.

Des mesures analogues à celles de Dautriche ont été faites, en Amérique par A. M. Comey ⁽²⁾. Il admettait que la transmission de la détonation se faisait par l'intermédiaire d'une onde aérienne. Il mesurait, par la méthode de Dautri-

⁽¹⁾ *C. R.*, t. CXLIV, 1907, p. 1030.

⁽²⁾ *VII^e Congrès International de Chimie appl.*, Londres, 1909, section III, b, p. 28.

che, l'intervalle de temps nécessaire à la transmission de la détonation d'une cartouche d'explosif à une autre située à une distance déterminée. Les nombres qu'il a ainsi trouvés sont de l'ordre de grandeur de ceux de Dautriche.

Nous pouvons en conclure que l'onde de choc que nous avons photographiée peut être identifiée à l'ébranlement aérien auquel on attribue, dans bien des cas, la transmission de la détonation à distance. Nous reviendrons à cette question quand nous exposerons les expériences que nous avons faites sur ce sujet.

Onde de choc d'un détonateur au fulminate de mercure.

— Nous pouvons citer ici une expérience dans laquelle nous avons photographié l'onde de choc produite par la détonation d'une capsule en cuivre de 5 mm. 65 de diamètre et contenant 2 g. de fulminate de mercure. Cette capsule était placée dans un tube de verre de 6 mm. de diamètre intérieur. On voit sur cette photographie reproduite par la figure 43, une onde de choc qui s'est propagée sur une quinzaine de centimètres, et dont la vitesse s'est amortie très rapidement. Celle-ci passa d'une valeur de 3 000 m./sec. environ, sur les 3 ou 4 premiers centimètres de son parcours, à une vitesse de 1 500 à 1 800 m./sec. sur les derniers centimètres où elle est encore visible. Cette expérience permet d'expliquer l'inflammation d'un mélange gazeux à l'aide d'un détonateur au fulminate. En effet, si on se reporte à la figure 15, qui est la reproduction d'une photographie obtenue en faisant détoner une capsule de fulminate à l'extrémité d'un tube contenant le mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$, on voit — comme nous l'avons déjà indiqué — qu'il n'y a pas de période de combustion précédant l'établissement de l'onde explosive. Mais on peut remarquer que sur les 3 ou 4 premiers centimètres on a

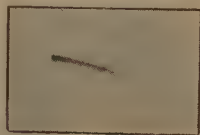


Fig. 43. — Onde de choc produite par la détonation d'une capsule de 2 g. de fulminate de mercure.

eu une vitesse supérieure à celle de l'onde explosive. Pendant cette période il s'est développé une *onde de choc et combustion* ⁽¹⁾ qui correspond au début du parcours de l'onde de choc de la figure 43, et l'onde explosive a commencé à se propager à la vitesse de 1800 m./sec., lorsque l'onde de choc a eu atteint cette vitesse.

Si, au lieu de faire détoner la capsule de fulminate dans un tube, on la fait détoner à l'air libre, en la suspendant par

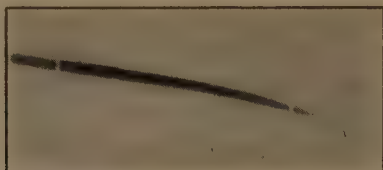


Fig. 44. — Onde de choc produite par une colonne de dynamite de 10 cm. (diamètre 12 mm.).

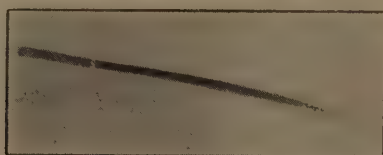


Fig. 45. — Onde de choc produite par une colonne de dynamite de 15 cm. (diamètre 12 mm.).

un fil métallique par exemple, on n'obtient aucune image photographique. En effet il ne peut se former, dans ce cas, qu'une onde sphérique, et celle-ci s'amortit beaucoup trop rapidement pour pouvoir impressionner le papier sensible. Ceci lève l'objection que l'on pourrait présenter au sujet des photographies que nous avons obtenues pour l'onde explosive sphérique dans les mélanges gazeux détonants.

Vitesse de l'onde de choc. — Nous avons vu que, dans un

(1) Voir JOUGUET, *Mécanique des Explosifs*, p. 240.

tube de 13 mm. de diamètre contenant de la dynamite à la densité 0,90, l'onde de choc est visible sur une soixantaine de centimètres. Sa vitesse qui est au début de l'ordre de 7 000 m./sec., décroît assez rapidement pour n'avoir plus qu'une valeur de 2 000 m./sec. sur les 10 derniers centimètres où elle impressionne le papier photographique. Nous avons fait un certain nombre d'expériences pour étudier les facteurs qui influent sur ces grandeurs.

Avec un tube de 12 mm. de diamètre et contenant encore de la dynamite sur une longueur de 10 cm., sous la même densité, l'allure du phénomène n'est pas changée. L'onde de choc est encore visible sur une soixantaine de centimètres. Sa vitesse au début de son parcours est encore de l'ordre de 7 000 m./sec. environ (fig. 44). On obtient encore les mêmes résultats si la longueur de la colonne de dynamite est de 15 cm., toutes autres conditions étant égales (fig. 45).

On peut remarquer sur ces photographies, que l'intensité lumineuse de l'onde de choc est bien plus grande, — tout au moins sur les 10 ou 15 premiers centimètres de son parcours — que celle du phénomène explosif qui s'est propagé dans la dynamite. Il en résulte que la température qui règne sur le front de l'onde de choc doit être extrêmement élevée.

Mais si le tube contenant la dynamite est d'un diamètre moindre que dans les expériences précédentes, on a un phénomène lumineux moins intense et surtout moins étendu. De plus la vitesse de l'onde de choc est au début moins élevée. Ainsi la photographie reproduite par la figure 46, a été obtenue avec un tube de 5 mm. 5 de diamètre, contenant une colonne de dynamite de 33 cm de longueur à la densité moyenne de 0,95. L'onde explosive s'est propagée à la vitesse uniforme de 2 400 m./sec. environ. L'onde de choc est visible sur une longueur de 27 à 28 cm. Sa vitesse a été sur les 10 ou 12 premiers centimètres de son parcours de l'ordre de 4 000 m./sec. ; puis elle est allée en s'amortissant et sur les derniers centimètres elle n'était plus que de 2 000 m./sec.

environ. Nous avons obtenu les mêmes chiffres pour toutes les expériences dans lesquelles le diamètre des tubes était compris entre 5 et 7 mm. Il en est avec des tubes de ce diamètre comme avec des tubes de diamètre plus considérable : la longueur sur laquelle l'onde de choc est visible est indépendante de la longueur de la colonne d'explosif. Ainsi la figure 47 est la reproduction d'une photographie obtenue avec un tube de 6 mm. de diamètre intérieur, contenant une colonne de dynamite de 15 cm. de longueur à la densité de chargement de 0,90. L'onde de choc est visible sur la même longueur que dans la figure 46, où la colonne de dynamite



Fig. 46. — Onde de choc produite par une colonne de dynamite de 33 cm. (diamètre 6 mm.).



Fig. 47. — Onde de choc produite par une colonne de dynamite de 15 cm. (diamètre 6 mm.).

avait 33 cm. de longueur. On peut remarquer aussi que la vitesse de l'onde de choc est la même dans les deux cas : les deux images de l'onde de choc sont exactement superposables.

Il y a encore un autre facteur que l'on peut faire varier : c'est la densité de chargement. Mais nous avons déjà vu que l'intervalle dont nous pouvons disposer est assez faible. Pour la dynamite, où il est le plus étendu, il s'étend depuis 0,80 jusqu'à la densité 1,15. Nous avons cependant pu observer que la longueur sur laquelle l'onde de choc est visible doit être une fonction croissante de la densité de chargement. Ainsi dans un tube de 6 mm. de diamètre intérieur, contenant de la dynamite sous la densité de chargement 0,80,

l'onde de choc est visible sur une longueur de 25 cm., alors que, comme nous l'avons vu, pour les densités 0,90-0,95, cette longueur est de 28 à 30 cm. Mais, nous n'avons pu mettre en évidence aucune différence entre la vitesse de l'onde de choc produite par l'explosion d'une dynamite à la densité 0,8 et celle d'une dynamite sous une densité égale à l'unité.

En résumé, nous pouvons conclure que *lorsqu'une onde de choc se propage dans un tube cylindrique, la longueur sur laquelle elle est visible et sa vitesse initiale de propagation sont des fonctions croissantes du diamètre du tube. Mais elles sont indépendantes de la longueur de la colonne d'explosif* qui a donné naissance à l'onde de choc, à partir tout au moins d'une colonne dont la longueur est égale à quelques fois le diamètre du tube. La vitesse de cette onde de choc atteint au début des valeurs considérables, bien supérieures même à la vitesse de détonation de l'explosif. Mais *elle va rapidement en s'amortissant*, et le papier sensible cesse d'être impressionné lorsqu'elle a atteint une valeur de l'ordre de 2 000 m./sec.

II. — Propagation de l'onde choc dans divers gaz.

Dans les expériences rapportées dans les pages précédentes, la dynamite détonait dans un tube contenant de l'air. Nous avons fait aussi des expériences dans des tubes contenant divers gaz, combustibles ou non, pour étudier la propagation de l'onde de choc dans ces gaz.

Pour ces expériences, nous avons employé des tubes de 6 à 7 mm. de diamètre et de 75 cm. de longueur. La dynamite occupait, dans ces tubes, une longueur de 25 cm. à la densité moyenne de 0,95. Le tube était d'abord ouvert à ses deux extrémités, de manière à y faire circuler un courant du gaz étudié afin de le remplir de ce gaz. Celui-ci était contenu

dans un gazomètre. Avec une surpression d'une dizaine de centimètres d'eau, il circulait très aisément dans le tube contenant la dynamite. Au moment de faire l'explosion le tube était fermé à ses deux extrémités, à l'aide d'une rondelle en carton du côté où l'on plaçait le détonateur, et à l'aide d'un bouchon de liège à l'extrémité opposée.

Nous avons vu qu'avec l'air, dans un tube de 7 mm. de diamètre, l'onde de choc est visible sur 27 cm. environ. Il en est de même si le tube dans lequel on fait l'explosion contient

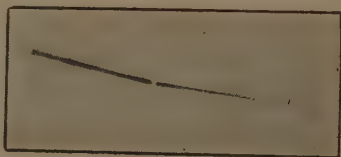
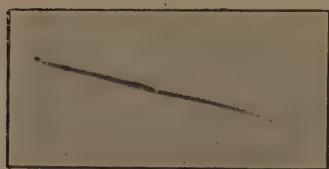


Fig. 48. — Onde de choc dans l'oxygène (dynamite sur 25 cm.).

Fig. 49. — Onde de choc dans l'hydrogène (dynamite sur 25 cm.).

une atmosphère d'azote ou d'oxygène. Ainsi la photographie reproduite par la figure 48 a été obtenue avec un tube contenant de l'oxygène. Elle est tout à fait comparable à celle de la figure 46 avec laquelle elle est superposable : les vitesses de l'onde de choc sont donc les mêmes dans les deux cas. On obtient encore des résultats tout à fait semblables avec les gaz suivants : oxyde de carbone, anhydride carbonique, anhydride sulfureux, protoxyde et peroxyde d'azote. Dans toutes ces expériences, non seulement la vitesse de l'onde de choc est à peu près la même que dans l'air, mais encore son intensité lumineuse n'en diffère pas notablement.

Avec l'hydrogène, au contraire, on obtient des résultats un peu différents. D'abord, si l'onde de choc est visible sur une longueur qui est sensiblement la même que dans l'air, sa vitesse s'amortit assez peu sur ce parcours (fig. 49). Cette

vitesse est donc à peu près uniforme : elle est de l'ordre de 5 000 m./sec.

L'hydrogène sulfuré donne un résultat tout à fait différent : on n'a pour ainsi dire pas d'onde de choc impressionnant le papier sensible, sauf sur les 3 ou 4 premiers centimètres seulement (fig. 50). Ceci peut s'expliquer par le fait que la chaleur dégagée au passage de l'onde de choc, au lieu de servir à élever la température du gaz, est absorbée par la décomposition de l'hydrogène sulfuré.

Et en effet, si on emploie au contraire un gaz dont la décomposition dégage de la chaleur, l'onde de choc est alors visible



Fig. 50. — Onde de choc dans l'hydrogène sulfuré (dynamite sur 25 cm.).

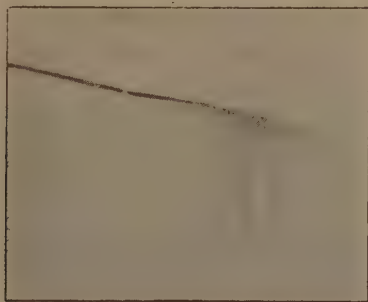


Fig. 51. — Onde de choc dans l'acétylène (dynamite sur 25 cm.).

sur une plus grande longueur que dans l'air. Ainsi la photographie de la figure 51 a été obtenue avec un tube rempli d'acétylène à la pression atmosphérique. Au delà de la dynamite on voit un phénomène lumineux qui s'est propagé sur une longueur de 40 cm. environ. Sur les 10 à 15 premiers centimètres du parcours de l'onde de choc, la pression étant très élevée la décomposition de l'acétylène a été pour ainsi dire instantanée. On voit, au contraire, d'après l'éten-

due de l'image. que sur les 25 derniers centimètres, la pression s'étant amortie, la décomposition de l'acétylène tout en étant encore très rapide, a néanmoins duré pendant un temps appréciable et les gaz sont restés lumineux pendant environ $1/2\ 000$ de seconde. D'ailleurs, l'aspect de cette photographie est tout à fait analogue à celui des photographies obtenues par Berthelot et Le Chatelier dans leurs recherches sur la vitesse de détonation de l'acétylène ⁽¹⁾. Dans cette expérience. — comme aussi dans toutes les expériences précédentes — le tube de verre a été complètement pulvérisé en une poussière impalpable, qui après l'explosion forme dans la salle un nuage assez lent à se déposer. Mais sur le fer à « T » sur lequel était posé le tube, on pouvait remarquer une traînée noire de carbone provenant de la décomposition de l'acétylène. Berthelot a obtenu un résultat semblable en étudiant la décomposition de l'acétylène ⁽²⁾ sous l'influence de la détonation du fulminate de mercure.

Avec le cyanogène, on a encore un résultat semblable. La partie lumineuse s'étend cependant sur une moins grande longueur (fig. 52), mais elle est bien plus intense. La température, dans ce cas, doit être beaucoup plus élevée. En effet, la décomposition du cyanogène dégage 74 cal., tandis que celle de l'acétylène n'en dégage que 58.

Nous avons encore fait détoner de la dynamite dans des tubes contenant des mélanges gazeux détonants, tels que $2H^2 + O^2$ ou $CS^2 + 3O^2$. Comme on peut le prévoir, l'onde explosive est amorcée dans ces mélanges gazeux par l'onde de choc, dès que la vitesse de celle-ci atteint la valeur caractéristique de la vitesse de l'onde explosive du mélange étudié. Ainsi la photographie reproduite par la figure 53 a été obtenue avec un tube contenant le mélange $CS^2 + 3O^2$. L'onde

(¹) *Ann. Ch. et Ph.*, 7^e série, t. XX, 1900, p. 15.

(²) *Sur la force des matières explosives*, p. 106.

de choc s'est d'abord propagée avec une vitesse de plusieurs milliers de mètres par seconde, et n'a atteint la vitesse de 1 800 m./sec., caractéristique du mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$, qu'après un parcours de 25 cm. environ. A partir de ce point l'onde explosive s'est développée et s'est propagée à la vitesse de 1 800 m./sec.

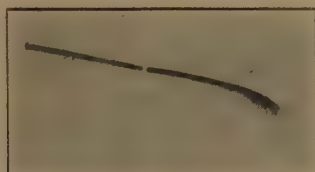


Fig. 52. — Onde de choc dans le cyanogène (dynamite sur 25 cm.).

Ce phénomène peut servir à expliquer comment un détonateur peut donner naissance à une onde explosive dans un mélange gazeux détonant. Nous avons vu qu'un détonateur

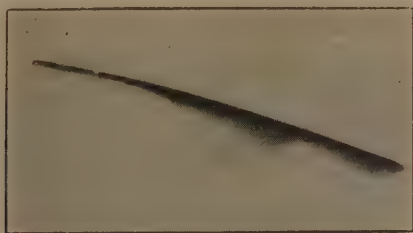


Fig. 53. — Onde de choc dans le mélange $\text{CS}^2 + 3\text{O}^2$ (dynamite sur 15 cm.).

placé dans un tube de verre produit une onde de choc qui s'amortit très rapidement. D'autre part nous avons vu que lorsqu'on amorce l'explosion d'un mélange gazeux par l'action d'un tel détonateur, l'onde explosive ne s'établit pas instantanément à sa vitesse caractéristique. Elle prend seulement naissance lorsque l'onde de choc a atteint la vitesse de l'onde explosive. Avec le mélange $2\text{H}^2 + \text{O}^2$, pour lequel la

vitesse de propagation de l'onde explosive est relativement élevée, on peut même voir sur les photographies (fig. 54), à la fois l'onde de choc produite par le fulminate de mercure, et l'onde explosive qui se propage à la vitesse uniforme de 2 800 m./sec. La vitesse de l'onde de choc s'amortissant très

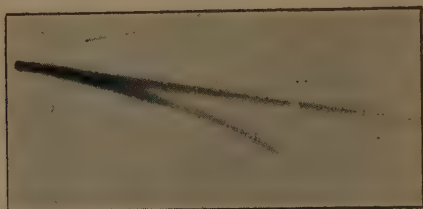


Fig. 54. — Onde de choc et onde explosive dans le mélange $H^2 + O$ (détonateur au fulminate).

rapidement, l'image de l'onde explosive se sépare de celle de l'onde de choc au moment où celle-ci atteint la vitesse de 2 800 m./sec. On a d'ailleurs le même phénomène si on pro-

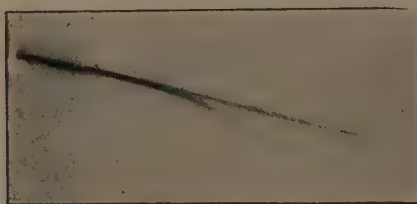


Fig. 55. — Onde de choc et onde explosive dans le mélange $H^2 + O$ (dynamite sur 15 cm.).

voque la détonation du mélange oxy-hydrique à l'aide d'une colonne de dynamite au lieu d'un détonateur au fulminate (fig. 55).

Nous pouvons donc conclure de toutes ces expériences, qu'un explosif solide détonant dans un tube au contact d'un gaz, donne toujours naissance à une onde de choc, se

propageant tout d'abord à des vitesses de plusieurs milliers de mètres par seconde, mais s'amortissant très rapidement. Dans certains cas (acétylène, cyanogène, hydrogène sulfuré), cette onde de choc décompose le gaz ; elle est alors plus ou moins visible, suivant que cette décomposition dégage ou absorbe de la chaleur. Si l'on a affaire à un mélange gazeux détonant, cette onde de choc donne naissance à l'onde explosive.

III. — Influence de la pression.

Nous avons déjà vu que pour vérifier que l'illumination de l'atmosphère du tube était bien due à une onde de choc,



Fig. 56. — Onde de choc d'une colonne de 20 cm. de dynamite sous une pression de 0^{mm} 1 de Hg.



Fig. 57. — Onde de choc d'une colonne de 20 cm. de dynamite sous une pression de 0 mm. 04 de Hg.

nous avons fait une expérience en opérant en tube scellé dans le vide. La dynamite était introduite sur une fraction de la longueur du tube, comme dans les expériences précédentes ; puis le vide était fait à l'aide d'une trompe double à vapeur de mercure ⁽¹⁾. Enfin le tube était scellé au chalumeau.

On arrive péniblement après plusieurs heures de fonctionnement de la trompe à obtenir un vide de 0,02 ou

(1) WEISS, *Ann. Ch.*, 9^e série, t. XIX, 1923, p. 231.

0,03 mm., de mercure, alors que dans le même tube ne contenant pas de dynamite un tel vide est obtenu en moins de trois minutes. Des pressions inférieures au $1/100^e$ de millimètre de mercure sont très difficiles à obtenir.

La photographie reproduite par la figure 56 a été obtenue avec un tube de 75 cm. de longueur et de 7 mm. de diamètre intérieur, contenant une colonne de 20 cm. de dynamite à la densité moyenne de 0,90. Avant de sceller le tube on y avait fait un vide de 0 mm. 1 de mercure. On voit qu'au delà de la dynamite l'atmosphère du tube n'a été illuminée que sur une longueur de 4 à 5 cm. environ. Avec un meilleur vide, la partie illuminée est un peu moins longue, 2 ou 3 cm. seulement dans le cas de la photographie n° 57, où la pression était de 0 mm. 04. Pour une pression de 0 mm. 02 cette longueur est encore un peu plus faible. On peut en conclure que cette longueur tend vers zéro pour un vide rigoureusement parfait.

Au contraire, en augmentant la pression à l'intérieur du tube, la longueur de la partie illuminée croît rapidement. Mais on constate que pour des pressions comprises entre 5 mm. et une douzaine de centimètres de mercure, la partie qui impressionne le papier photographique est bien plus étendue, que lorsqu'on opère à la pression atmosphérique. Alors qu'avec un tube de 7 mm. de diamètre, et sous une pression de 2 à 3 mm., le papier sensible n'est impressionné que sur une longueur de 8 à 10 cm., pour une pression de 6 à 7 mm., il est impressionné sur une quarantaine de centimètres (fig. 58). Dans cette expérience la détonation de la dynamite s'est propagée à la vitesse uniforme de 2500 m./sec.; l'onde de choc a parcouru une quarantaine de centimètres à la vitesse moyenne de 5000 m./sec. environ, puis elle n'a plus impressionné le papier sensible. Nous avons vu qu'à la pression atmosphérique la vitesse de l'onde de choc s'amortit bien plus rapidement, puisqu'après un parcours de près de 30 cm., sa vitesse n'est plus que de 2000 m./sec.

Avec une pression un peu plus forte le phénomène est à peu près le même. Ainsi sous une pression de 25 à 30 mm., l'onde de choc est visible sur une soixantaine de centimètres. En faisant croître encore la pression, par exemple en opérant



Fig. 58. — Onde de choc d'une colonne de 20 cm. de dynamite sous une pression de 6 mm. de Hg.

sous une pression de 5 cm., on a une onde de choc visible sur 70 cm. environ : c'est le cas de la photographie reproduite par la figure 59. Le phénomène est à peu près le même jusqu'aux pressions de 12 cm. environ ; ainsi la

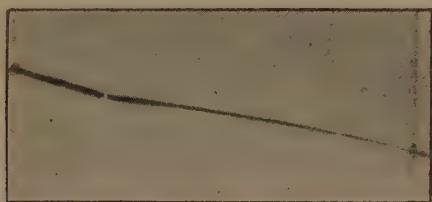


Fig. 59. — Onde de choc d'une colonne de 20 cm. de dynamite sous une pression de 5 cm. de Hg.

photographie de la figure 60 a été obtenue sous une pression de 10 cm. Mais à partir d'une pression de 15 cm., l'aspect des photographies est tout à fait semblable à celui des photographies obtenues à la pression atmosphérique. Ainsi la photographie de la figure 61 a été faite sous une pression de 30 cm. ; elle est tout à fait comparable à la photographie de la figure 46, obtenue à la pression atmosphérique.

Les résultats précédents peuvent être résumés à l'aide du tableau suivant. Dans la première colonne sont portées les pressions en millimètres de mercure et dans la seconde les

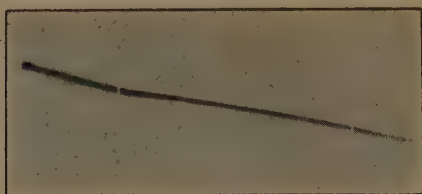


Fig. 60. — Onde de choc d'une colonne de 20 cm. de dynamite sous une pression de 10 cm. de Hg.

longueurs en centimètres sur lesquelles l'onde de choc est visible sur les photographies (c'est-à-dire les longueurs au

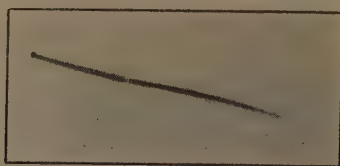


Fig. 63. — Onde de choc d'une colonne de 20 cm. de dynamite sous une pression de 30 cm. de Hg.

bout desquelles la vitesse de propagation est passée de 6 000 m. à 2 000 m./sec.).

P	0,04	0,1	3	7	25	50	120	300	760
L	2	4	10	40	60	70	75	30	28

Nous avons repris ces expériences avec divers gaz purs. On obtient les mêmes résultats qu'avec l'air : *il existe un intervalle de pression, compris entre 0 cm. 5 et 12 cm. environ, pour lequel l'onde de choc est visible sur une étendue deux ou trois fois plus considérable qu'à la pres-*

sion atmosphérique, et dans lequel la vitesse de l'onde de choc s'amortit bien moins vite que dans l'air. Ainsi les photographies reproduites par les figures 62 et 63, ont été obtenues dans les mêmes conditions que les précédentes,

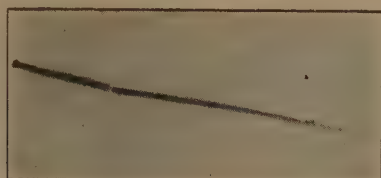


Fig. 62. — Onde de choc dans l'oxygène sous une pression de 5 cm.

mais avec des tubes contenant, le premier une atmosphère d'oxygène, le second une atmosphère d'acide carbonique, tous deux à la pression de 5 cm. de mercure.

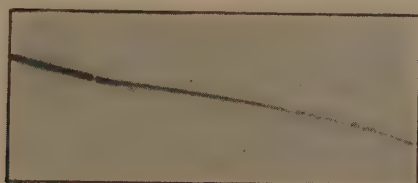


Fig. 63 — Onde de choc dans l'azote sous une pression de 5 cm.

Il semble qu'on puisse expliquer ce maximum de visibilité de l'onde de choc aux pressions réduites de la manière suivante. Puisque la vitesse de l'onde de choc est au début la même — que l'on opère à la pression atmosphérique ou sous une pression réduite — c'est que le rapport des pressions en avant et immédiatement en arrière du front de l'onde est le même dans les deux cas ⁽¹⁾. Donc la pression

⁽¹⁾ Voir JOUGUET, *Mécanique des explosifs*, chap. II, p. 240 et p. 348.

immédiatement en arrière du front de l'onde, doit être plus faible dans le cas où la pression initiale est inférieure à la pression atmosphérique. Il semble alors assez naturel de penser que les gaz provenant de l'explosion de la cartouche de dynamite, s'opposent d'une manière plus efficace à la détente de l'air situé en arrière du front de l'onde de choc, lorsque la pression de cet air est moins élevée que lorsqu'elle est plus élevée. Par conséquent, dans ce cas la vitesse de cette onde de choc s'amortira moins vite que lorsque la pression initiale qui règne dans le tube est la pression atmosphérique.

Bien entendu dans le cas où la pression atmosphérique est nulle il ne peut être question d'une onde de choc.

IV. — Propagation de l'onde de choc à travers les solides.

Après avoir étudié la propagation de l'onde de choc dans les gaz, il nous a semblé assez intéressant d'étudier sa propagation à travers les solides.

Si l'on place dans un tube de verre un disque d'une matière quelconque (verre, métal, etc.), perpendiculaire aux génératrices du tube, ce disque transmet l'onde de choc, pourvu toutefois que son épaisseur ne dépasse pas une certaine valeur, qui est en général de l'ordre de quelques millimètres.

Dans ces expériences nous opérions de la manière suivante. L'explosif, c'est-à-dire la dynamite n° 1, était introduit dans un tube de verre de 12 à 13 mm. de diamètre, et d'un mètre de longueur. Il occupait dans ce tube une longueur de 10 cm. à la densité moyenne de chargement 0,95. A l'extrémité de cette colonne d'explosif était placé un disque de verre ou de métal. Ce disque était collé aux parois du tube avec du baume du Canada.

Avec une lame de mica de $\frac{1}{10}$ de millimètre d'épaisseur, la photographie obtenue montre que cet obstacle n'atténue ni la vitesse de l'onde de choc, ni son intensité lumineuse. Aussi avons-nous utilisé des disques de verre de plusieurs



Fig. 64. — Transmission de l'onde de choc par une lame de verre de 0 mm. 75 d'épaisseur.

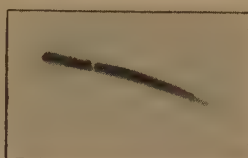


Fig. 65. — Transmission de l'onde de choc par une lame de verre de 1 mm 2 d'épaisseur.



Fig. 66. — Transmission de l'onde de choc par une lame de verre de 1 mm. 5 d'épaisseur.

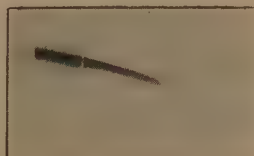


Fig. 67. — Transmission de l'onde de choc par une lame de verre de 3 mm. 2 d'épaisseur.



Fig. 68. — Transmission de l'onde de choc par une lame de verre de 4 mm. 1 d'épaisseur.

millimètres d'épaisseur. Les photographies reproduites par les figures 64, 65, 66, 67 et 68 ont été obtenues dans les conditions indiquées plus haut, avec des disques de verre

dont les épaisseurs étaient respectivement : 0 mm. 75; 1 mm. 2; 1 mm. 5; 3 mm. 2; 4 mm. 1. On voit qu'au fur et à mesure que l'on fait croître l'épaisseur de la lame de verre la longueur visible de l'onde de choc diminue ainsi que son intensité, pendant que sa vitesse de propagation s'amortit plus rapidement. Sur la dernière de ces photographies, obtenue avec une lame de 4 mm. 1 d'épaisseur, l'onde de choc n'est visible que sur quelques centimètres seulement et son intensité est très faible. Si l'on emploie une lame de 4 mm. 2 d'épaisseur, l'onde de choc n'est plus visible. Donc, pour une lame de verre, l'épaisseur de 4 mm. 1 est, dans les conditions de l'expérience, l'épaisseur limite au delà de laquelle l'onde de choc n'est plus visible sur les photographies.

Nous avons porté dans le tableau suivant les longueurs (en centimètres) sur lesquelles l'onde de choc est visible, en fonction de l'épaisseur (en millimètres) de la lame de verre.

<i>e</i>	0	0,75	1,2	1,5	3,2	4,1	4,2
L	60	36	24	21	16	3	0

En remplaçant le verre par d'autres corps, des métaux par exemple, tels que le cuivre, l'aluminium, le plomb, on obtient des photographies semblables à celles que nous avons reproduites dans le cas du verre; mais l'épaisseur au delà de laquelle l'onde de choc n'est plus visible est un peu plus faible que dans le cas du verre, toutes autres conditions étant les mêmes. Ainsi pour le plomb cette épaisseur maxima est de 2 mm. 1, et pour l'aluminium de 3 mm. 25.

De ces expériences on peut conclure que l'onde de choc se transmet à travers les corps solides, et que, pour un corps donné son amortissement est fonction de l'épaisseur de ce corps.

V. — Transmission de la détonation à distance.

Lorsqu'on fait détoner une amorce de fulminate, une cartouche de dynamite, de la nitro-glycérine, du coton-poudre, etc., la détonation peut se transmettre *par influence* à une autre masse de matière explosive, ne se trouvant pas en contact direct avec la première. Nous avons eu l'occasion de signaler que depuis longtemps on a eu l'idée d'attribuer la transmission à distance de ces détonations à la propagation d'un choc dont l'impulsion première est produite par la pression qui résulte de l'explosion de la première cartouche d'explosif.

Dans son ouvrage sur la *Force des Matières Explosives*, Berthelot explique ce phénomène de la manière suivante. La « commotion » due au développement subit de très grandes pressions se propage, soit par l'intermédiaire du sol et des supports, soit à travers l'air lui-même. En atteignant une nouvelle masse de matière explosive, la force vive de ce choc se transforme en chaleur au sein de cette matière explosive, et celle-ci détone à son tour. C'est cette commotion que nous avons photographiée, ce qui nous a permis d'en préciser la nature et de l'assimiler à une onde de choc ou compression, et dont nous venons d'étudier les propriétés dans les pages précédentes.

Nous avons vu que la vitesse de cette onde de choc et, par conséquent, son énergie, s'amortit assez rapidement. Ceci explique que la distance à laquelle peut être transmise l'explosion est en général assez réduite si l'on opère sur des masses de matière explosive de l'ordre de quelques grammes ou dizaines de grammes. Pour des quantités plus importantes, l'explosion peut être transmise à des distances relativement considérables, plusieurs mètres et même davantage. Le même fait explique encore que ces distances varient avec

le milieu qui transmet l'onde de choc, avec ses propriétés physiques, sa densité, son élasticité, etc.

De très nombreuses expériences ont été entreprises pour déterminer les distances auxquelles peuvent se transmettre les détonations. D'après ce que nous venons de dire on conçoit que ces distances ne sont valables que pour les conditions dans lesquelles elles ont été déterminées, conditions qui bien souvent sont fort différentes de celles dans lesquelles on se trouve dans la pratique.

Les expériences que nous avons entreprises dans ce domaine ont eu simplement pour but d'étudier la propagation de l'onde de choc, dans l'intervalle qui sépare deux colonnes d'explosif détonant par influence. Nous avons

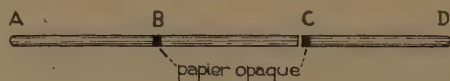


Fig. 69.

opéré de la manière suivante. Un premier tube de verre AC, était rempli de dynamite sur une fraction AB seulement de sa longueur. Ce tube était mis bout à bout avec un second tube CD, complètement rempli de dynamite, et de manière telle que la partie du premier tube ne contenant pas d'explosif se trouvait entre les deux colonnes de dynamite AB et CD (fig. 69). La détonation était amorcée avec un détonateur au fulminate placé à l'une des extrémités A ou D de l'un des tubes.

Dans ces conditions, la longueur maxima de l'intervalle BC qui permet de transmettre la détonation d'une des deux colonnes de dynamite à l'autre, est comprise entre 16 et 20 cm. suivant le diamètre des tubes, celui-ci variant entre 6 et 9 mm. Mais dans le cas où l'inflammation de la dynamite est provoquée à l'extrémité A du tube, la détonation se transmet à une distance BC plus longue de 1 cm. 5 que si la détonation est amorcée à l'autre extrémité D.

La photographie reproduite par la figure 70 a été obtenue avec un tube de 8 mm. de diamètre, disposé suivant le schéma de la figure 69, le détonateur étant placé à l'extrémité D, c'est-à-dire que la détonation s'est propagée de D vers A, le point D se trouvant à gauche sur la photographie. On distingue très bien les trois parties, correspondant aux deux colonnes d'explosif AB et CD, et à l'intervalle BC dans lequel s'est propagée l'onde de choc de B en C, à une vitesse moyenne très sensiblement égale à celle de la détonation au sein de la dynamite, soit 2600 m./sec. environ. La vitesse de cette onde de choc aurait été plus élevée s'il n'y avait pas eu une discontinuité en D. Celle-ci a, en effet,

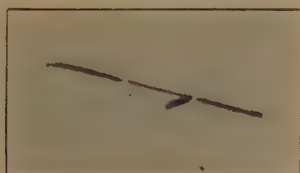


Fig. 70. — Transmission de la détonation d'une première colonne de dynamite à une seconde située à 15 cm.

provoqué une détente sur le front de l'onde de choc, ce qui a abaissé la pression et la température sur le front de l'onde de choc au delà de la discontinuité ; et d'ailleurs, l'image de cette onde de choc est relativement peu intense. On peut remarquer aussi sur la photographie une onde de choc rétrograde, qui s'est propagée dans le tube à partir du point C et en arrière sur 7 ou 8 cm. environ. On peut en conclure que le tube n'était pas encore brisé au moment où cette onde rétrograde a cessé d'impressionner le papier sensible, c'est-à-dire environ $1/10000^e$ de seconde après le passage de l'onde de choc directe au même point. Bien entendu, après l'explosion la partie centrale du tube a été, comme les parties contenant la dynamite, pulvérisée en éclats à peu près impalpables.

Si on place le détonateur à l'extrémité A du tube, on obtient une photographie analogue à celle reproduite par la figure 71. Dans cette expérience, la longueur du tube AC était de 25 cm. Il contenait une colonne AB de dynamite de 15 cm. de longueur, de sorte que l'intervalle BC entre les deux colonnes AB et CD de dynamite était de 10 cm. Le tube CD avait également une longueur de 15 cm. et un diamètre intérieur de 8 mm., comme le tube AC. La densité moyenne de chargement était de 0,90. On distingue très nettement sur la photographie trois parties. La première, vers la gauche correspond à la propagation de la détonation dans la colonne AB de dynamite. La seconde à la propaga-

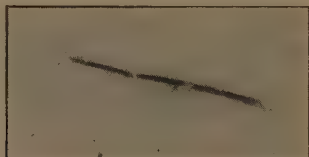


Fig. 71. — Transmission de la détonation d'une première colonne de dynamite à une seconde située à 10 cm.

tion de l'onde de choc dans l'air dans l'intervalle BC, et la troisième à la détonation qui s'est propagée de C en D à partir de l'instant où l'onde de choc en arrivant en C lui a donné naissance. La vitesse de l'onde de choc dans l'intervalle BC est supérieure à la vitesse de la détonation au sein de la dynamite; on est, en effet, dans les mêmes conditions que celles dans lesquelles nous nous sommes placés lorsque nous avons étudié la propagation de l'onde de choc, puisque de A en C il n'y a pas de discontinuité. Il en résulte que *la colonne de dynamite CD a détoné après un intervalle de temps plus court après l'instant où la détonation a été amorcée, que si on avait eu une colonne ininterrompue de dynamite dans les tubes AC et CD.* Cet intervalle de temps est d'ailleurs très facilement mis en évidence, car les deux

images correspondant à AB et à CD, ne sont pas dans le prolongement l'une de l'autre. Ce fait est encore plus net sur la photographie représentée par la figure 72, dans laquelle le diamètre des tubes employés était de 10 mm. ; nous avons vu, en effet, qu'en augmentant le diamètre du tube, la vitesse de l'onde de choc est augmentée et s'amortit moins rapidement. Dans cette expérience la distance BC était encore de 15 cm., mais les longueurs AB et CD avaient été réduites à 10 cm., de manière à ne pas augmenter exagérément la quantité d'explosif employée. Dans ce cas le décalage entre les deux images des parties AB et CD est très appréciable. Il correspond à un peu moins de $1/30\,000^e$ de seconde, c'est-à-dire que le tube CD a détoné près de

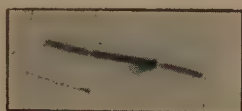


Fig. 72. — Transmission de la détonation d'une première colonne de dynamite à une seconde située à 15 cm.

$1/30\,000^e$ de seconde plus tôt que si on avait eu une colonne ininterrompue de dynamite depuis A jusqu'en D.

Propagation de la détonation au sein d'un explosif pulvérulent. — Cette dernière expérience peut nous servir à expliquer certaines propriétés de la propagation de la détonation dans les explosifs pulvérulents. Dans un tel explosif, le mécanisme de la détonation ne peut être le même qu'au sein d'un explosif homogène, comme par exemple de l'acide picrique fondu ou bien de la dynamite-gomme. Nous pouvons admettre que dans un explosif pulvérulent, la détonation est transmise d'un grain à un autre par l'intermédiaire d'une onde de choc, comme dans les expériences de transmission de la détonation à distance. Or cette onde de choc se propage à une vitesse qui s'amortit assez rapidement. Si l'explosif a

une densité moyenne bien définie, tous les grains qui le constituent sont à des distances peu différentes et on peut admettre que la détonation sera transmise de chaque grain au suivant dans des temps peu différents. On aura donc ainsi une vitesse moyenne pour les différentes ondes de choc transmettant la détonation d'un grain à un autre. Dès lors la vitesse mesurée pour la propagation de la détonation dans un tel explosif pulvérulent, ne sera que la moyenne entre la vitesse de transmission de la détonation au sein de l'explosif solide homogène et la vitesse moyenne de l'onde de choc transmettant la détonation d'une particule d'explosif à une autre.

Si on comprime l'explosif, les différentes particules se rapprocheront les unes des autres, et la vitesse moyenne de propagation des ondes de choc sera plus grande que pour une plus faible densité. Puisque nous savons que la vitesse d'une onde de choc s'amortit assez rapidement, la vitesse que l'on observera pour la transmission de la détonation sera également plus grande. Mais si l'on continue à comprimer l'explosif la distance entre les différents grains continuant à diminuer, on conçoit qu'à partir d'un certain point la vitesse de propagation aille en décroissant, puisque la vitesse de l'onde de choc qui transmet la détonation d'un grain à un autre est bien supérieure à celle de la propagation de la détonation à l'intérieur d'un grain. Ceci explique, dans le cas des explosifs pulvérulents, l'allure des courbes des vitesses de détonation en fonction de la densité de chargement, dont nous avons parlé dans le chapitre sur la propagation de la détonation.

CHAPITRE III

Spectrographie des explosions.

Nous avons pensé que l'analyse spectrographique de la lumière émise par les explosions, pourrait nous fournir des résultats intéressants sur le phénomène explosif. Nous avons en particulier eu pour but de comparer le spectre de la période de combustion à celui de la période de l'onde explosive, dans le cas des mélanges gazeux détonants, et le spectre de la détonation à celui de l'onde de choc dans le cas des explosifs solides.

Ces recherches avaient donc plutôt un but qualitatif qu'un but quantitatif. Aussi n'avons-nous pas employé un appareil compliqué et susceptible de nous fournir des résultats d'une très grande précision. D'ailleurs la nature de ces recherches ne nous aurait pas permis d'employer un appareil délicat. Nous avons, en effet, au cours de ces expériences, fait détoner des quantités de dynamite de 10 à 15 gr. environ, contenues dans des tubes de verre. La violence de l'explosion aurait rapidement mis hors d'usage un appareil délicat. C'est pourquoi, nous avons employé un dispositif à la fois simple et robuste, qui permettait d'éloigner suffisamment le tube contenant l'explosif de l'appareil dispersif, ainsi que de l'objectif et de la plaque photographique.

Le dispositif spectrographique que nous avons employé comprenait comme appareil dispersif un prisme de flint. L'appareil photographique était un appareil ordinaire, muni d'un objectif de 33 cm. de distance focale. Le tube contenant l'explosif était placé verticalement. Son diamètre était de 12

à 15 mm., mais il était entouré d'un papier opaque sur une grande partie de sa circonférence, de manière à laisser seulement une fente de 3 à 4 mm. de largeur. La lumière émise par l'explosion était reçue par une des faces du prisme. Après réfraction et dispersion par le prisme, cette lumière était reçue par l'objectif de l'appareil photographique. On avait de la sorte, sur la plaque le spectre de la lumière émise au moment de l'explosion. Le prisme et l'appareil photographique, — situés à 5 m. environ du tube contenant l'explosif — étaient protégés des effets de l'explosion par un bouclier placé en avant du tube contenant l'explosif. Ce bouclier était percé d'une fente assez large occupée par une glace sans tain transparente protégeant l'objectif.

Les plaques employées étaient des plaques dites « Reporter ». Elles sont d'une grande sensibilité pour toutes les radiations depuis le violet jusqu'au rouge, avec une intensité cependant moindre pour les radiations vertes. Elles sont de plus douces d'une grande « rapidité », propriété indispensable pour photographier des phénomènes lumineux d'une durée qui est dans bien des cas inférieure au $1/10000^e$ de seconde.

Nous avons au préalable étalonné le prisme en longueurs d'onde, en opérant de la manière suivante. Nous placions au-dessus du tube contenant l'explosif un tube de verre de 4 mm. de diamètre extérieur et de 15 cm. de longueur, rempli de mercure. A côté de ce tube était placée une lampe à vapeur de mercure. Le prisme était protégé des rayons directs de cette lampe par un écran E percé d'une fente. De la sorte les rayons lumineux arrivant sur le prisme sont ceux qui sont réfléchis par le tube contenant le mercure et formant miroir. Ce tube est vu du prisme sous un angle assez faible pour pouvoir être confondu avec une ligne suffisamment fine pour la précision des mesures de nos expériences. On obtient ainsi sur la plaque photographique le spectre de la lampe à vapeur de mercure. Avec une durée de pose de 100 secondes

pour la partie du spectre comportant les radiations de grande longueur d'onde, et de 50 secondes pour les radiations de courte longueur d'onde, le spectre obtenu était extrêmement net. Ce spectre s'étendait sur une longueur de 40 mm. et comportait les lignes correspondant aux radiations suivantes, exprimées en unités Angström :

1	4 047
2	4 078
3	{ 4 347
	{ 4 358
4	4 916
5	5 461
6	{ 5 770
	{ 5 790

Pour repérer d'une manière certaine les particularités des spectres des explosions, dans chaque expérience nous photographiions le spectre précédent sur la plaque même sur laquelle nous devons ensuite photographier le spectre de l'explosion. On avait ainsi sur la plaque le spectre du mercure au-dessus du spectre de l'explosion.

J. Dewar a déjà étudié le spectre de l'explosion du mélange oxyhydrique contenu dans des tubes de verre⁽¹⁾. Il a montré qu'il comprend des lignes caractéristiques du sodium et du calcium, éléments se trouvant dans le verre des tubes contenant le mélange explosif. Mais nous avons voulu comparer le spectre de la période de combustion précédant la formation de l'onde explosive, au spectre de l'onde explosive elle-même. Dans ce but nous avons opéré avec le mélange de sulfure de carbone et d'oxygène $CS^2 + 3O^2$. Nous avons d'ailleurs déjà vu que la combustion et la détonation de ce mélange procurent une lumière très intense.

Le spectre de la période de combustion est un spectre continu, dans lequel se trouvent un certain nombre de raies brillantes que nous avons identifiées avec les suivantes :

(1) *Proc. Roy. Soc.*, t. XXVI, p. 471.

Longueurs d'onde (U. A.)	Eléments correspondants
5 890 à 5 896	Na
5 580 à 5 600	Ca
(4 425 à 4 455)	Ca
(4 280 à 4 320)	Ca
4 227	Ca

Les deux premières et la dernière de ces raies sont les plus intenses et se retrouvent sur toutes les photographies. Les deux raies entre parenthèses ont une plus faible intensité. Elles sont de plus un peu moins nettes et ne se retrouvent pas sur toutes les photographies. Les éléments auxquels correspondent ces raies se trouvent à l'état de silicates dans le verre des tubes contenant le mélange explosif. Pour vérifier que c'est bien là l'origine de ces raies, nous avons fait les expériences suivantes. Nous avons d'abord déposé sur les parois du tube une très faible quantité de chlorure de strontium. Dans ce cas on observe d'une manière très nette, dans le spectre de la période de combustion, la raie 4 607 correspondant au strontium. D'autre part en enduisant les parois du tube de verre d'une couche de collodion, on obtient un spectre continu ne comportant aucune raie.

L'intensité des raies précédentes diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'inflammation du mélange gazeux, c'est-à-dire au fur et à mesure que la durée du phénomène lumineux diminue, et que l'on se rapproche de la naissance de l'onde explosive. En photographiant le spectre de l'onde explosive, — toujours avec le même mélange détonant — on observe des raies moins intenses et moins nombreuses. Seules les raies 5 580-5 600 et 4 227 du calcium, et la raie 5 890 du sodium, sont encore visibles.

En photographiant le spectre d'explosion d'un explosif solide, la dynamite, on obtient des résultats tout à fait différents, suivant que la région photographiée correspond à la détonation de l'explosif, ou bien à l'onde de choc qui se propage dans l'air contenu dans le tube au delà de la dynamite. Le spectre correspondant à la détonation de la dynamite est

un spectre continu dans lequel nous n'avons observé aucune des raies précédentes. Au contraire, en photographiant le spectre de la région correspondant à l'onde de choc, nous avons pu mettre en évidence un très grand nombre de raies que nous avons identifiées avec les suivantes correspondant toutes au calcium (U. A.) :

5 580 à 5 600
 4 425 à 4 455
 4 280 à 4 320
 4 227
 3 969
 3 934

Si l'on met dans le tube un fil de cuivre, on observe — toujours dans la région de l'onde de choc —, la raie 4 651 de cet élément. Avec un fil de magnésium on observe les raies 4 480 et 4 352 qui correspondent au magnésium. Donc alors qu'on n'obtient aucune raie dans le spectre de la période de détonation, on en observe, au contraire un très grand nombre dans le spectre de l'onde de choc. Ce fait vient à l'appui de ce que nous avons déjà dit au sujet de la température extrêmement élevée de l'onde de choc.

En résumé, *dans le cas des mélanges gazeux détonants, le spectre de la période de combustion et celui de l'onde explosive, sont des spectres continus dans lesquels on peut observer des raies correspondant aux éléments se trouvant dans les parois du tube dans lequel a lieu l'explosion.* Ces raies sont moins intenses et moins nombreuses pour l'onde explosive que pour la période de combustion, la durée du phénomène lumineux étant plus faible dans le premier cas que dans le second. Dans le cas des explosifs solides, *le spectre de la période de détonation est encore un spectre continu, mais on n'y observe aucune raie.* Au contraire un grand nombre de raies correspondant aux éléments des parois sont très visibles dans le spectre de l'onde de choc, ce qui vient confirmer le fait que, dans ce cas la température des gaz est considérablement élevée.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Nous avons, dans ce mémoire, rapporté les résultats des recherches que nous avons entreprises, par la méthode d'enregistrement photographique de Mallard et Le Chatelier, pour étudier la détonation des explosifs gazeux et solides.

Nos recherches sur les mélanges gazeux explosifs, ont porté d'abord sur la formation et la propagation des ondes explosives planes. Nous avons en particulier étudié l'influence du diamètre du tube dans lequel se propage le phénomène explosif, sur *la longueur sur laquelle s'étend la période de combustion* qui précède la naissance de l'onde explosive. Nous avons montré que cette longueur est une *fonction croissante du diamètre du tube*.

Nous avons également étudié l'influence d'une brusque augmentation du diamètre du tube sur la propagation de l'onde explosive. En particulier, nous avons étudié *la longueur de la période de combustion qui succède à l'onde explosive* à partir de l'endroit de la discontinuité dans le diamètre du tube. *La longueur de cette période est une fonction croissante du rapport des diamètres des tubes*.

Nous avons encore étudié la propagation de l'onde explosive dans des tubes dont les parois ont une épaisseur de l'ordre du dixième de millimètre, et nous avons montré que, dans de tels tubes, *la vitesse de l'onde explosive est la même que dans des tubes à parois épaisses*.

L'influence de la température a également fait le sujet de quelques expériences, que nous avons faites jusqu'à des températures voisines de la température d'inflammation

du mélange détonant. D'après ces expériences, la vitesse de l'onde explosive — jusqu'au voisinage de la température d'inflammation — est une fonction légèrement décroissante de la température, comme cela avait déjà été montré pour les températures comprises entre 10° et 100°.

Enfin, nous avons montré qu'en provoquant l'inflammation d'un mélange gazeux explosif à l'aide d'un détonateur d'une énergie suffisante on pouvait avoir *formation et propagation d'une onde explosive sphérique*.

Nous avons aussi appliqué la méthode d'enregistrement photographique à l'étude de la détonation des explosifs solides. Nos photographies nous ont permis de mettre en évidence dans des tubes de verre, la propagation d'un phénomène lumineux, que nous avons attribué à une *onde de choc ou de compression*. Celle-ci se propage à des vitesses considérables, bien supérieures à celle de la détonation de l'explosif lui-même ; mais *cette vitesse s'amortit assez rapidement*. Nous avons étudié les diverses propriétés de cette onde de choc relatives à sa *propagation dans l'air*, sous diverses pressions, ainsi que *dans divers gaz* (combustibles ou non). Nous avons aussi étudié sa *propagation à travers les solides* et nous avons appliqué les résultats précédents à l'étude de la *transmission de la détonation à distance*.

Les gaz dans lesquels se propage cette onde de choc sont portés à des *températures considérables* comme le confirment nos expériences de *spectrographie*.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
INTRODUCTION.	1
I. Historique.	1
1. Les mélanges gazeux détonants	1
2. Les explosifs solides	9
3. Théorie de l'onde explosive	13
II. Plan du mémoire	16

PREMIÈRE PARTIE

L'onde explosive	
dans les mélanges gazeux détonants	19
CHAPITRE PREMIER. — Méthode et appareils utilisés	19
1. Appareils de photographie et d'enregistrement	19
2. Préparation des mélanges détonants.	24
CHAPITRE II. — La formation de l'onde explosive.	27
Influence du diamètre des tubes	28
Amorçage de l'onde explosive par le fulminate de mercure.	37
CHAPITRE III. — La propagation de l'onde explosive.	39
I. Influence de la variation du diamètre	40
1. Influence d'une brusque augmentation du diamètre	40
2. Influence d'une brusque diminution du diamètre	48
II. Influence de la nature et de l'épaisseur des parois.	49
III. Influence de la température	53
CHAPITRE IV. — L'onde explosive sphérique	60

DEUXIÈME PARTIE

Pages

La détonation des explosifs solides.

L'onde de choc. 68

CHAPITRE I. — La propagation des détonations. Influence de la densité de changement dans des tubes de faible diamètre	68
---	----

CHAPITRE II. — L'onde de choc	77
---	----

1. Propagation de l'onde de choc dans l'air	77
---	----

Onde de choc d'un détonateur au fulminate de mercure	83
--	----

Vitesse de l'onde de choc	84
-------------------------------------	----

2. Propagation de l'onde de choc des divers gaz	87
---	----

3. Influence de la pression	93
---------------------------------------	----

4. Propagation de l'onde de choc à travers les solides	98
--	----

5. Transmission de la détonation à distance	101
---	-----

CHAPITRE III. — Spectrographie des Explosions	107
---	-----

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.	112
--------------------------------	-----

TABLE DES MATIÈRES	114
------------------------------	-----

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Absorption des radiations par l'atmosphère terrestre

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 30 Mars 1925.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

M. MOLLIARD.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

P. APPELL.

